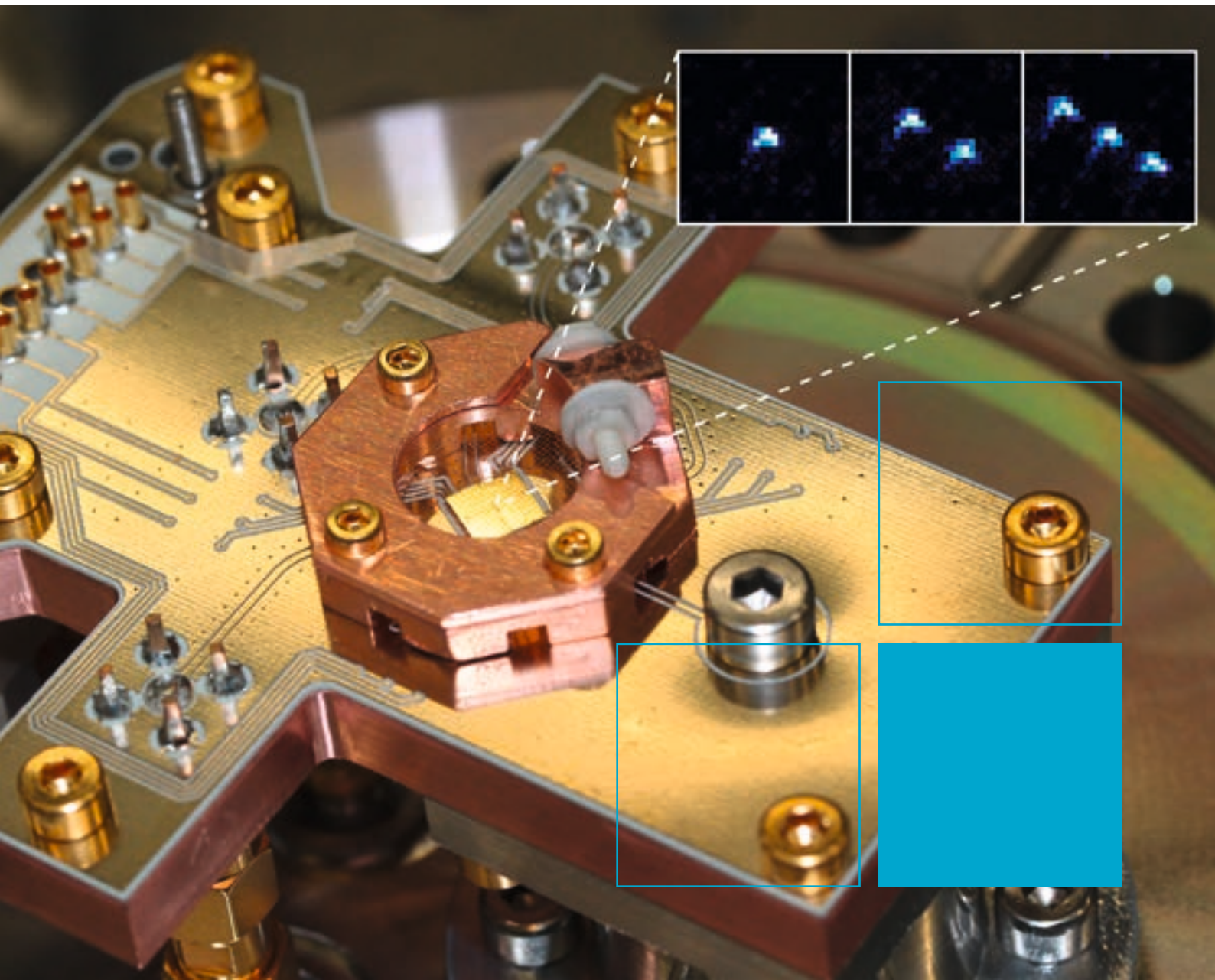
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Abteilung 4
Optik
Abteilungsbericht 2018

Institute for Experimental Quantum Metrology (QUEST)
Institutsbericht 2018



Abteilung 4
Optik
Hon.-Prof. Dr. S. Kück
Telefon: (0531) 592-4010
E-Mail: stefan.kueck@ptb.de

Fachbereich 4.1
Photometrie und Spektroradiometrie
Dr. A. Sperling
Telefon: (0531) 592-4100
E-Mail: armin.sperling@ptb.de

Fachbereich 4.2
Bild- und Wellenoptik
Dr. E. Buhr
Telefon: (0531) 592-4200
E-Mail: egbert.buhr@ptb.de

Fachbereich 4.3
Quantenoptik und Längeneinheit
Dr. H. Schnatz
Telefon: (0531) 592-4300
E-Mail: harald.schnatz@ptb.de

Fachbereich 4.4
Zeit und Frequenz
Dr. E. Peik
Telefon: (0531) 592-4400
E-Mail: ekkehard.peik@ptb.de

Fachbereich 4.5
Angewandte Radiometrie
Dr. S. Winter
Telefon: (0531) 592-4500
E-Mail: stefan.winter@ptb.de

Nachwuchsgruppe 4.01
Metrologie für funktionale Nanosysteme
Dr. S. Kroker
Telefon: (0531) 592-4530
E-Mail: stefanie.kroker@ptb.de

Institute for Experimental Quantum Metrology (QUEST)
Prof. Dr. .P. O. Schmidt
Telefon: (0531) 592-4700
E-Mail: piet.schmidt@ptb.de

Auszug aus dem PTB-Organigramm (Dezember 2018)

Titelseite: Chiphalter einer mehrlagigen Oberflächenfalle für Beryllium-Ionen basierend auf einem skalierbaren Fabrikationsprozess.

Die Abteilung *Optik* bearbeitet vielfältige Aufgaben im Bereich der optischen Metrologie. In der Abteilung werden, ausgehend von den Basiseinheiten Candela, Meter und Sekunde, unterschiedliche abgeleitete Einheiten realisiert und mit angemessener Messunsicherheit an Kunden in Industrie und Gesellschaft weitergegeben. Darüber hinaus betreibt die Abteilung Forschung auf höchstem Niveau zur Untersuchung fundamentaler physikalischer Fragestellungen. Die Abteilung gliedert sich derzeit in fünf Fachbereiche und bearbeitet die Themenbereiche *Länge und dimensionelle Metrologie*, *Photometrie und Radiometrie*, sowie *Zeit und Frequenz*.

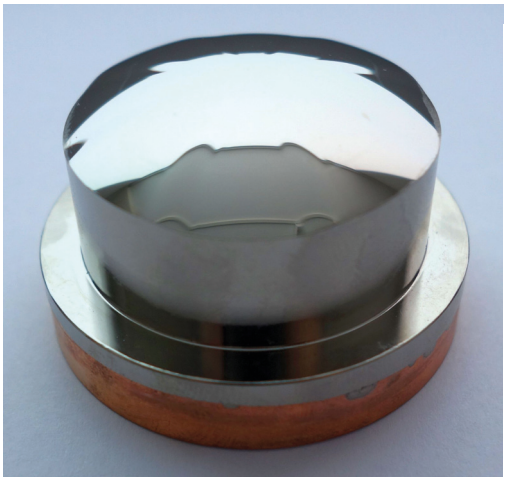
Das vergangene Jahr stand für die Abteilung *Optik* und für das QUEST-Institut sehr im Zeichen der Quantentechnologien. Das Exzellenzcluster „QuantumFrontiers“ wurde in Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig erfolgreich eingeworben. Ebenfalls ist die PTB und damit auch die Abteilung *Optik* sehr prominent im Regierungsprogramm der Bundesregierung zu den Quantentechnologien vertreten. Insbesondere soll in den nächsten Jahren ein Kompetenzzentrum Quantentechnologie aufgebaut werden, welches die Belange der deutschen Industrie auf diesem Gebiet unterstützt. Beide Aspekte sind explizit unter den „Nachrichten des Jahres“ aufgeführt.

Das QUEST-Institut ist eine gemeinsame Einrichtung der PTB und der Leibniz Universität Hannover. Die drei Forschungsgruppen am Institut beschäftigen sich mit der Grundlagenforschung und Quantentechnologie-Entwicklung in den Themenbereichen *Quanten-Engineering mit gefangenen Ionen*, *Quantenuhren und komplexe Systeme*, sowie *Quantenlogik-Spektroskopie*. Das gemeinsame Forschungsinteresse sind die präzise Kontrolle atomarer Quantensysteme für die Metrologie, Tests der fundamentalen Physik sowie die Verwendung von Vielkörpersystemen und Quantenkorrelationen für Präzisionsmessungen.

Länge und dimensionelle Metrologie

Die Arbeiten im Themenbereich *Länge und dimensionelle Metrologie* wurden schwerpunktmäßig bestimmt durch die Weiterentwicklung der Messtechnik und der Messverfahren für die Ebenheitsmessung, die Asphären- und Freiformflächenmessung, die Mikroskopie sowie die Bestimmung des Silizium-Gitterparameters.

Im Bereich der Formmessungen von Messsystemen für Asphären- und Freiformflächen sind entscheidende Fortschritte bei der Fertigung und der Rückführung von Referenznormalen erreicht worden. Um die Genauigkeit der Formmessungen zu charakterisieren, sind rückgeführte Kalibrierflächen erforderlich. Besonders bewährt haben sich dabei die sogenannten Multiradienflächen, die Kugelsegmente mit verschiedenen Radien kombinieren, siehe Bild 1. In der Herstellung und Charakterisierung der Multiradienflächen wurde durch die enge Zusammenarbeit zwischen der Fertigungs- und der Messtechnik die Form der Artefakte sehr genau hergestellt. Die Maximalabweichung (peak-to-valley) wurde um mehr als das 20-fache verringert, d. h. von einem Wert von ca. 4 µm auf etwa 200 nm, siehe Bild 1. Darüber hinaus wurde die Oberfläche aus Kupfer vor der Endbearbeitung mit einer Nickel-Phosphor(NiP-)-Beschichtung versehen, sodass sie eine höhere Härte



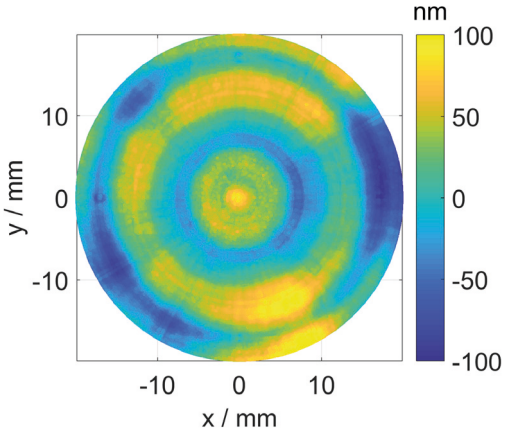


Bild 1:
Links: Multiradien-Artefakt.
Rechts: Abweichung zur Soll-Form, gemessen mit dem Tilted-Wave-Interferometer (TWI)

Bild 2: Mitte: Preisträger Jan-Hendrik Hagemann (PTB), links: Dr. Frank Löffler (CC UPOB), rechts: Prof. Dr. Gerald Fütterer (TH Deggendorf). Quelle: CC UPOB e. V.

aufweist und auch als Referenz für taktile Messsysteme mit geringer Messkraft verwendet werden kann.

Neben der Charakterisierung der Radien in den Kugelsegmenten mit dem PTB-Radiusmessplatz für Kugelabschnitte wurde auch die Sphärizität der Kugelsegmente mit einem Fizeau-Interferometer sequenziell gemessen. Diese Ergebnisse wurden zur Charakterisierung eines Tilted-Wave-Interferometers, das Asphären und Freiformflächen messen kann, herangezogen. Die Übereinstimmung der Sphärizitäten in den sphärischen Segmenten ist besser als 10 nm (Root-mean-square(RMS)-Abweichung). Dieser Wert ist somit vergleichbar mit der Höhenmessunsicherheit des Fizeau-Interferometers [I. Fortmeier et al., Opt. Eng. 58(9), 092602 (2019)].

Weitere Aktivitäten im Bereich der Formmessung umfassten die Erstellung eines Konzeptes zur interferometrischen zeilenbasierten Formmessung mit einer nachgeführten Mehrzeilenkamera. Mit diesem neuartigen Konzept sollen asphärische Prüflinge mit Durchmessern bis zu 200 mm gemessen werden. Außerdem wurde das Design eines geeigneten Kalibrierobjektes zur Messung von Taumel- und Dezentrierungsfehlern vorgestellt. Ferner wurde eine neue Methode zur Messung der Linsenform entwickelt, die als primäre Messgröße die räumliche Kohärenzfunktion des Lichts nutzt. Diese Methode (Multiple Aperture Shear Interferometry – MarS) erlaubt die gleichzeitige Verwendung von mehreren unabhängigen Lichtquellen, um auch komplexe Formen zu erfassen. Erste Vergleichsmessungen mit der Wellenfrontmethode zeigten eine gute Übereinstimmung. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der interferometrischen Formmessung optischer Oberflächen mit einer teilkohärenten Multiquellenbeleuchtung gewann der PTB-Doktorand Jan-Hendrik Hagemann den in diesem Jahr erstmalig vergebenen Young Scientist Award des Kompetenzzentrums Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e. V. (CC UPOB), siehe Bild 2. Der Preis wurde im Rahmen des 9. High Level Expert Meeting „Asphere Metrology“ vergeben. Dieser Preis soll junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Gebiet der ultrapräzisen Oberflächenbearbeitung fördern und auszeichnen. Die Nominierten präsentierten dabei ihre Forschungsergebnisse dem Fachpublikum in Form eines Kurzvortrages und eines Posters.

Einen interessanten Ansatz für rückgeführte Längenmaßstäbe im Nanometerbereich bieten DNA-Origami-Nanostrukturen. Diese Nanostrukturen können mit hoher Reproduzierbarkeit mittels DNA-Origamitechnik hergestellt werden. Durch Anlagerung von einzelnen fluoreszierenden Molekülen an genau definierten Stellen lassen sich Längenmaßstäbe im Nanometerbereich realisieren, siehe die künstlerische Darstellung in Bild 3. In einer Kooperation zwischen der PTB und der TU Braunschweig ist es gelungen, die Abstände zwischen den fluoreszierenden Molekülen rückgeführt zu messen. Damit kann die Leistungsfähigkeit moderner überauflösender optischer Mikroskope untersucht werden, welche z. B. die superauflösende Einzel-Molekül-Lokalisation nutzen [M. Raab et al., Scientific Reports 8, 1780 (2018)].

Ebenfalls um Größen- und Formparameter im Nanometerbereich geht es bei Gold-Nanostäbchen. Diese

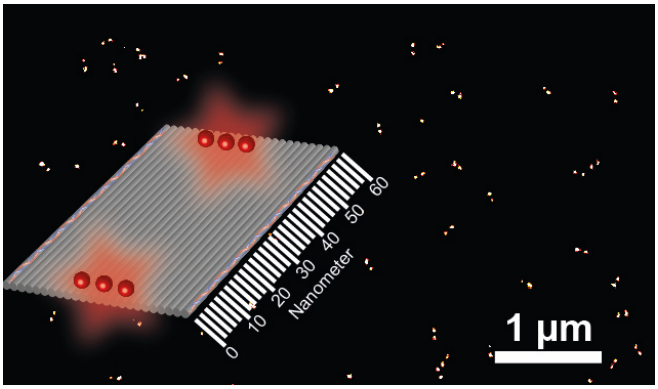
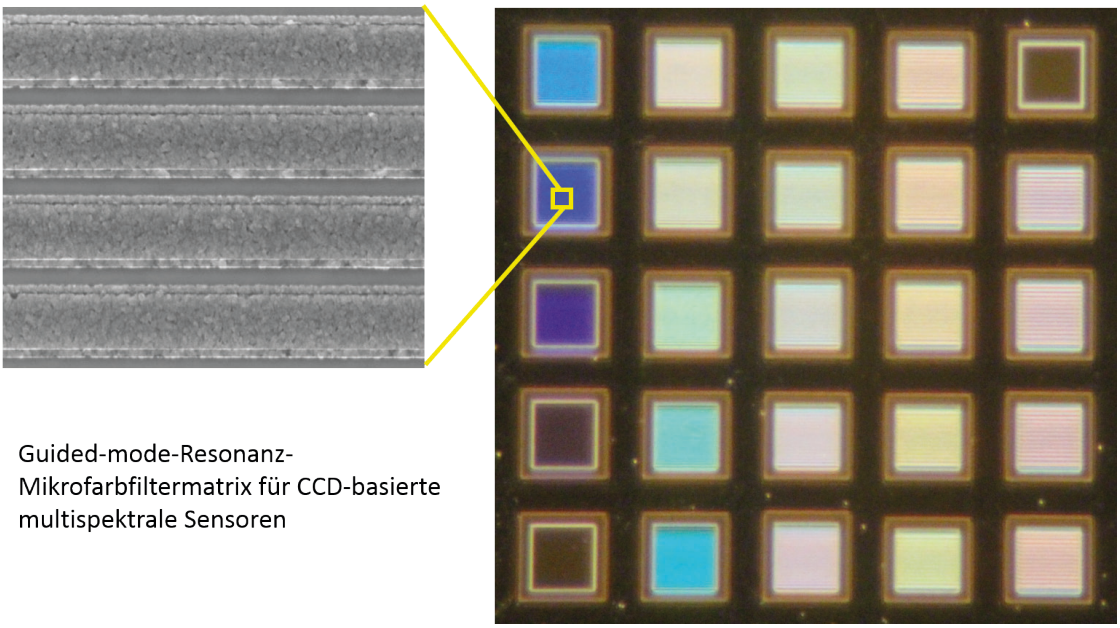


Bild 3: Künstlerische Darstellung des DNA-Origami-Nanometerlineals



Guided-mode-Resonanz-Mikrofarbfiltermatrix für CCD-basierte multispektrale Sensoren

Bild 4: Nanostrukturierter sogenannter „Geführte-Mode-Resonanz"(GMR)-Mikrofarbfilter.

Parameter sind für ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften, insbesondere für die Oberflächenplasmonenresonanz, von entscheidender Bedeutung. In einem internationalen Ringvergleich wurden elektronenmikroskopische Methoden zur Messung dieser Größen- und Formparameter entwickelt. Damit können jetzt z. B. etwaige Unterschiede zwischen verschiedenen Proben schnell und zuverlässig bestimmt werden. Das Verfahren wird derzeit in eine ISO-Norm überführt (ISO 21363).

Im Bereich der Scatterometrie und Ellipsometrie ist es ein strategisches Ziel, das Potential von optisch nicht-abbildenden Verfahren zur rückgeführten Messung, die von Strukturen sehr viel kleiner als die Wellenlängesind, zu eruieren und für anspruchsvolle Anwendungen in Industrie und Nanotechnologie umzusetzen. Hierzu wurde in der PTB wurde ein neues mathematisches Verfahren entwickelt, mit dem Messdaten eines Mueller-Ellipsometers ausgewertet werden. Anders als bislang üblich wird nun die Depolarisation des Lichtes, die durch den Prüfling verursacht wird, benutzt, um ein Maß für die Unsicherheit des nicht-depolarisierten Anteils abzuleiten. Bei den spektralen Messungen mit einem Mueller-Ellipsometer führt dies zu einer neuartigen Gewichtung der einzelnen Wellenlängenbeiträge zum Gesamtergebnis. Das Verfahren wird beispielsweise angewendet, um Geometrieparameter von Subwellenlängenstrukturen zu bestimmen.

Für Anwendungen in der medizinischen und biologischen Sensorik wurden im Rahmen einer Kooperation der TU Braunschweig, des Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA) und der PTB nanostrukturierte Mikrofarbfilter basierend auf periodischen Subwellenlängen-Metallgittern entworfen, entwickelt und gefertigt, siehe Bild 4. In Kombination mit CCD- oder CMOS-Bildsensoren sollen damit effiziente spektroskopische Sensoren für Anwendungen in Medizin und Biologie entwickelt werden. Mit einem speziell angepassten Mikroskop-Spektrometer für den UV-NIR-Spektralbereich wurden die Transmissionsspektren der 10 µm × 10 µm kleinen Filter gemessen und mit rigorosen Simulationsrechnungen verglichen. Sowohl Messungen als auch Simulationen dokumentieren die geringe spektrale Breite bei niedrigen Seitenbandintensitäten und damit die Eignung als schmalbandige effiziente Mikrofarbfilter.

Der Gitterparameter von Si-28 wird im Rahmen der Kristalldichtemethode für die Neudefinition der SI-Masseneinheit Kilogramm (kg) mit einem Röntgeninterferometer gemessen. Dazu ist eine stabile Relativposition der beiden separaten Teilkristalle aus Si-28 von wenigen 10 pm erforderlich, was eine extrem gute Schwingungsisolation erfordert. Dieses Ziel wird durch aktive und passive Dämpfungen, Isolationen und Regelungen erreicht. Die neunstufige Abfolge dieser Maßnahmen bekämpft gebäudeexterne und -interne Bodenschwingungen, Raumschall und Körperschall des Aufbaus selbst in einem Frequenzbereich von 0,2 Hz bis 200 Hz.

Die Nachwuchsgruppe „Metrologie für funktionale Nanosysteme“ beschäftigt sich mit der Entwicklung von Mikro- und Nanostrukturen für Komponenten in der optischen Sensorik und Quantenmetrologie sowie der Charakterisierung von dafür relevanten Materialeigenschaften auf Größenskalen von ca. 100 nm bis in den cm-Bereich. Zu den relevanten Nanosystemen gehören beispielsweise die oben genannten Mikrofarbfilter, aber auch optomechanische Systeme wie strukturierte Membranen für Temperatursensoren oder strukturierte Spiegelschichten für höchstauflösende Interferometrie. In vielen dieser Systeme limitieren Rauschprozesse die erreichbare Messgenauigkeit. In Kooperation u. a. mit der Moscow State University, der Columbia State University und der TU Delft entwickelt die Arbeitsgruppe Modellierungsmethoden, die wesentliche Rauschgrößen auch in komplexen Systemen exakt beschreibt. Dies ermöglicht erstmals ein ganzheitliches Design dieser Komponenten und damit perspektivisch deutlich höhere Messgenauigkeiten als bisher.

Darüber hinaus wurde ein Messaufbau zur photothermischen Ablenkungsspektroskopie (PDS) fertiggestellt, welcher ortsaufgelöste Absorptionsmessungen in dielektrischen Materialien ermöglicht. Dies ist insbesondere von Interesse, um den Zusammenhang von morphologischen Oberflächeneigenschaften mit der optischen Absorption von Halbleiternanostrukturen zu klären. In der optischen Hochpräzisionsmetrologie können selbst minimale Wärmeeinträge durch optische Restabsorption Messprozesse empfindlich stören. In aktuellen Arbeiten wird in Übereinstimmung von rigorosen multiphysikalischen Simulationen mit experimentellen Befunden gezeigt, dass in der Literatur bisher wichtige Beiträge zum Messsignal nicht einbezogen wurden. Die umfassende Betrachtung aller relevanten Einflussgrößen zeigt u. a., dass in kristallinem Silizium der Absorptionsbeitrag der Kristalloberfläche bisher um eine Größenordnung überschätzt wurde. Im nächsten Schritt wird nun untersucht werden, ob sich dieser Absorptionsbeitrag durch eine Oberflächenbehandlung, z. B. Strukturierung, verändert.

Photometrie und Radiometrie

In der Photometrie waren die metrologischen Aktivitäten des vergangenen Jahres wie bereits in den Jahren vorher stark geprägt durch die Marktdurchdringung von LEDs, die eine moderne, auf diese Lichtquellen gerichtete Messtechnik erfordern. Eine wichtige Komponente könnte hierbei zukünftig der sogenannte PQED (Predictable Quantum Efficient Detector, siehe Bild 5) sein. Im Rahmen des internationalen EMRP-SIB57-Forschungsprojekts „New Primary Standards and Traceability for Radiometry“ (NEWSTAR) wurde ein solcher Detektor mit berechenbarer Quanteneffizienz experimentell untersucht und metrologisch charakterisiert. „Berechenbare Quanteneffizienz“ bedeutet hierbei, dass der photoelektrische Effekt (d. h. die Umwandlung von Photonen in Elektronen) in den verwendeten Photodioden mit einer hohen Effizienz abläuft (nahe 100 %) und nur sehr geringe Verluste auftreten. Die Reflexionsverluste werden nahezu komplett durch eine bestimmte Anordnung der Photodioden zueinander verringert. Die dann immer noch verbleibenden, sehr geringen Verluste können aufgrund der Kenntnis der Photodiodenstruktur und bekannter physikalischer Effekte berechnet werden. Insgesamt ist die spektrale Empfindlichkeit des Detektors deshalb sehr genau berechenbar. Innerhalb des Forschungsprojekts NEWSTAR war es ein Ziel, die spektrale Empfindlichkeit einer Variante dieses Detektortyps, welche bei Raumtemperatur betrieben wird, mit einer Unsicherheit von 10^{-4} (0,01 %) zu berechnen bzw. diese Berechnungen experimentell zu validieren. Ein Teil der Charakterisierungsmessungen untersuchte die Verwendbarkeit dieses Detektors in der Photometrie und Radiometrie, also für Messungen optischer Strahlung mit unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich Polarisationsgrad, spektraler Bandbreite, Divergenz des Strahlfeldes, Bestrahlungsstärke usw. Die Ergebnisse der Charakterisierungen belegen die Berechenbarkeit des Detektors innerhalb der angestrebten Messunsicherheit von 10^{-4} und für die unterschiedlichen Messbedingungen [K. Salffner

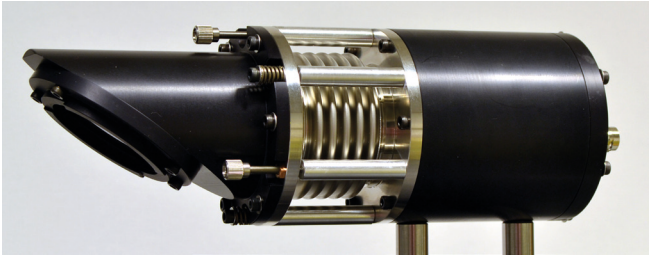


Bild 5: Foto des PQED (Predictable Quantum Efficient Detector), eines Detektors mit berechenbarer Quanteneffizienz (Courtesy of Aalto University)

Bild 6: LED-Lichtstärkenormal

et al., Metrologia 55, 654 (2018)]. Diese Ergebnisse sind somit ein starkes Indiz dafür, dass diese Art von berechenbaren, quanteneffizienten Detektoren als einfach handhabbare und kosteneffiziente Primärstandards für die Photometrie und Radiometrie verwendet werden könnten.

Der Paradigmenwechsel hin zu LEDs führt auch dazu, dass Lichtstärkenormale auf Basis thermischer Lampen zukünftig sehr wahrscheinlich nicht mehr erhältlich sein werden. Daher ist die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) bemüht, LEDs hinsichtlich ihrer Eignung als Referenzquellen für die Messgröße Lichtstärke zu untersuchen, und hat dazu eigens ein technisches Komitee (TC-2-90) gegründet. Zusätzlich wird diese Thematik im Rahmen des EMPIR-Projekts „Future photometry based on solid-state lighting products“ (PhotoLED) bearbeitet. Es wurden nun einige LED-Referenzspektren als Referenzlichtarten für farbmetrische Untersuchungen durch die CIE (CIE 15:2018) veröffentlicht. Eines dieser Referenzspektren wurde ausgewählt, um die dem Glühlampenlicht ähnliche Normlichtart A zu ergänzen [Alexander Kokka et al., Metrologia 55, 526 (2018)]. Hierzu hat die PTB in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern mehrere hochstabile Lichtstärkenormale entwickelt, die den geforderten Referenzspektren entsprechen, siehe Bild 6.

Ein weiterer Aspekt der Tätigkeiten umfasst die Verbesserung der Messtechnik für Kalibrierungen. Dies bezieht sich sowohl auf die Genauigkeit der Messung als auch auf kostengünstigere und schnellere Verfahren. So wurde eine Industriekamera mit 180°-Fisheye-Objektiv an der Ulbricht-Kugel der PTB installiert und validiert („Fisheye-Kameramethode“). Mittels an der PTB fortentwickelter Algorithmen wird aus den „Bildern“ der inneren Kugeloberfläche in Echtzeit der Lichtstärkeverteilungskörper der untersuchten Lampe bestimmt. Dieses schnelle und kostengünstige Verfahren konnte mit Hilfe des Robotergoniophotometers validiert werden und wird zur Reduzierung der Unsicherheit bei Messungen mit der Ulbricht-Kugel eingesetzt.

Auf organisatorischer Ebene wurde mit der Neugründung des Vereins „Deutsches Nationales Komitee der Internationalen Beleuchtungskommission CIE (DNK-CIE) e.V.“ ein bedeutender Meilenstein in Richtung einer verbesserten Unterstützung von Forschung, Entwicklung und Standardisierung im Bereich der Lichttechnik erreicht. Vereinsrechtliche Bestimmungen und neue Herausforderungen seitens der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) machten diese Neuorganisation erforderlich. Zum ersten Vorsitzenden des neuen Vereins wurde Dr. Armin Sperling, Leiter des Fachbereichs *Photometrie und Spektroradiometrie* der PTB, gewählt.

Bild 7: Gründungsveranstaltung des DNK e. V. am 5. April 2018 in der PTB

Im Bereich der Spektroradiometrie gibt es zunehmend Anforderungen in speziellen Spektralbereichen und für besondere Anwendungen. Für die UV-Radiometrie wurde daher ein neuer Messplatz entwickelt, an dem bis zu fünf verschiedene UV-Strahler parallel betrieben werden, um die Empfindlichkeit von UV-Radiometern bezüglich gewichteter Bestrahlungsstärke zu ermitteln, siehe Bild 8. Hierbei wird die spektrale Bestrahlungsstärke der einzelnen Strahler rechnerisch mit einer aktinischen Wirkungsfunktion gewichtet und das resultierende Integral mit der entsprechenden Anzeige der UV-Radiometer verglichen.

Bild 8: Messplatz für die gewichtete UV-Bestrahlungsstärke

Seit Längerem ist auch die Erfassung der Ozonsäule durch Messungen direkter solarer Bestrahlungsstärke im UV-Bereich von großer Bedeutung. In einer Industrie-Kooperation wurde ein neu entwickeltes kompaktes Array-Spektralradiometer charakterisiert und im Feldeinsatz getestet, siehe Bild 9. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Reduzierung des Streulichts, eines kritischen Parameters für qualitativ hochwertige Spektralmessungen. Streulicht im Innern des Instruments wird durch geeignete Designanpassungen von vornherein geometrisch-optisch reduziert und kann durch Zusatzmessungen effektiv korrigiert werden. Das Instrument liefert präzise und stabile Messungen der direkten solaren UV-Bestrahlungsstärke, aus denen sich die Ozonsäule zum Zeitpunkt der Messung ableiten lässt. Das Instrument wurde ausgiebig an der PTB in Braunschweig getestet und charakterisiert, bevor es am Atmosphärischen Observatorium Izaña auf Teneriffa in einer internationalen Vergleichsmesskampagne eingesetzt wurde. Die Vergleichsmessungen zeigten über den Zeitraum der Kampagne im Bereich der Messunsicherheiten eine

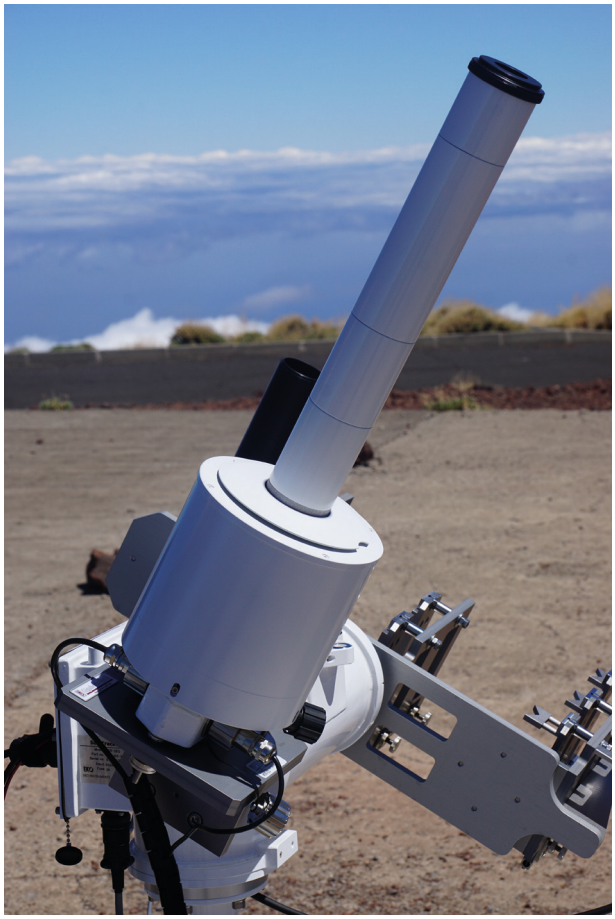


Bild 9: Wetterfestes BTS-2048-Spektralradiometer, aufgenommen bei der Vergleichsmesskampagne auf Teneriffa. Das Instrument ist zweiachsig der Sonne nachgeführt montiert. (Courtesy of Company Gigahertz-Optik GmbH)

gute Übereinstimmung zu klassischen Messverfahren mit den bisher verwendeten Dobson- oder Brewer-Instrumenten, die als Referenz dienen. Durch seinen kompakten Aufbau und die schnelle kontinuierliche Messfolge ermöglicht das Spektralradiometer somit eine wirksame Ergänzung zu den etablierten Messverfahren [R. Zuber et al., Atmos. Meas. Tech., 11, 2477 (2018)].

Im Fokus der anwendernahen Forschung und Entwicklung stand in den letzten Jahren u. a. die Validierung der Farbtypeskala der Internationalen Zuckerkommission (ICUMSA) auf einem neuen Messgerät, um künftig Kalibrierungen mit einem neuen Messverfahren durchführen zu können, siehe Bild 10. Durch Bestimmung aller apparativen Einflüsse konnte die existierende Zuckerskala [Methode GS2-13 (2012)] beibehalten werden. Zusätzlich wurde die Zucker-Skala zum „Braunschweig sugar type“ gemäß ICUMSA Methode GS-13 (2016) weiterentwickelt.

Bild 10: „Transfer“ der Zuckerskala.

Der moderne Messplatz ermöglicht eine 5-mal schnellere Messung, ein bedeutendes Kalibrierhemmnis wurde aufgelöst und neue Kunden wurden gewonnen.

Im Bereich der Metrologie für die Photovoltaik bietet die PTB maßgeblich Kalibrierleistungen für Solarzellen an. So hat der Laser-basierte DSR-Messplatz der Arbeitsgruppe *Solarzellen* an einem internationalen Rundvergleich zur Messung der Winkelabhängigkeit von Solarzellen teilgenommen. Die Kalibrierergebnisse der PTB waren für den gesamten Einfallswinkelbereich von 0° – 85° im Rahmen der angegebenen Messunsicherheit konsistent zum gewichteten Mittelwert der Gesamtgruppe. Somit kann dieser Messplatz für die Kalibrierung der Winkelabhängigkeit von Solarzellen als validiert angesehen werden, (Riedel et al., Proceedings EUPVSEC, 2018).

Um das Produktportfolio auch auf Solarmodule zu erweitern, werden in der neu gegründeten Arbeitsgruppe 4.53 „Solarmodule“ im Fachbereich 4.5 der PTB die dafür nötigen Labor- und Freifeld-Messplätze aufgebaut. Wie es bereits für Solarzellen der Fall ist, sollen auch für Solarmodule in Zukunft höchstgenaue Messungen angeboten werden. Dies erfordert die Weiterentwicklung bestehender und den Einsatz neuer Messverfahren, wie beispielsweise eines kürzlich an der PTB in Betrieb genommenen LED-basierten Sonnensimulators. Der Simulator ist das Herzstück des zukünftigen Modulmessplatzes und zeichnet sich

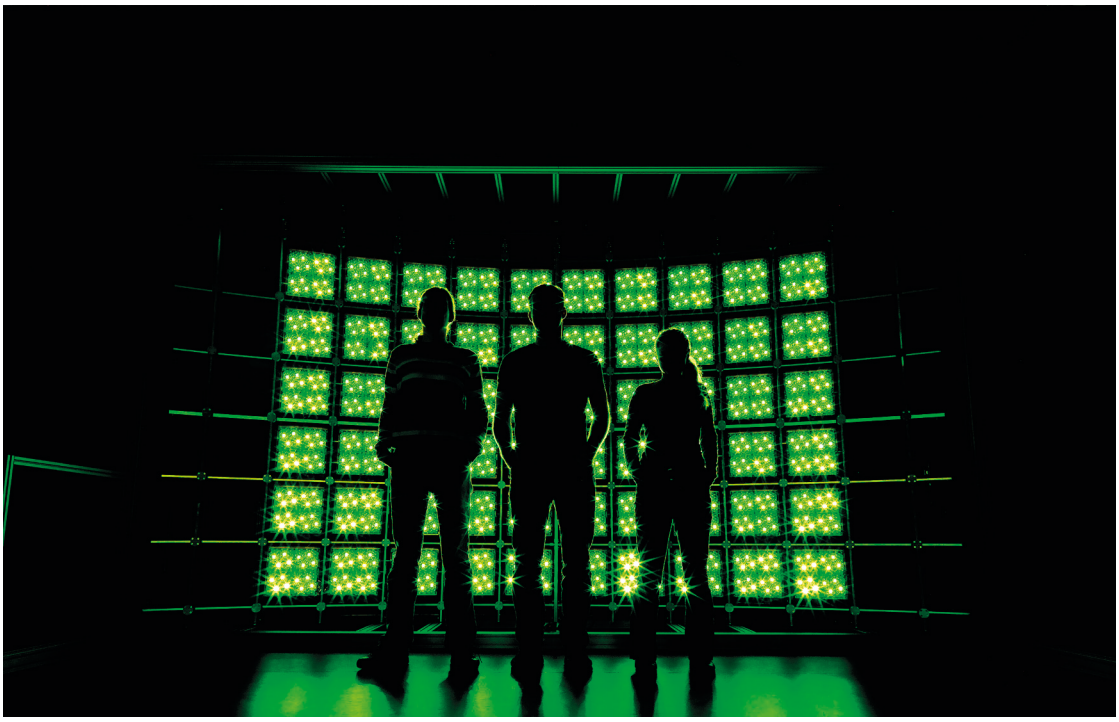


Bild 11: LED-basierter Modul-sonnensimulator bei angeschalteten grünen LEDs. Es stehen 18 verschiedenfarbige LEDs im Wellenlängenbereich von 370 nm – 1100 nm zur Verfügung. Um Sonnenlicht auf einer Prüfebene von 2 m x 1 m zu realisieren, sind insgesamt 16 320 LEDs auf 60 modulare Boxen verteilt und in einer Haltekonstruktion angeordnet. Die Leistungsaufnahme des Simulators beträgt maximal 60 kW.

durch insgesamt 16 320 Hochleistungs-LEDs aus, die in 18 verschiedenen individuell ansteuerbaren Farben im Wellenlängenbereich von 370 nm bis 1100 nm zur Verfügung stehen (Bild 11). Damit ist es möglich, das Verhalten von Solarmodulen mit einer Größe von bis zu 2 m × 1 m bei verschiedenen Lichtverhältnissen der Umwelt zu simulieren. Dieses Jahr konnten neben dem Aufbau des Simulators noch weitere wichtige Meilensteine erreicht werden, wie die Inbetriebnahme eines fünfachsigen Positioniersystems zur Modulpositionierung und die Planung und Beauftragung zur Fertigung einer speziellen Temperaturkammer für Solarmodule. Eine Temperierung der Module in Kombination mit frei einstellbaren spektralen Verteilungen ermöglicht in Zukunft die Vermessung von Prüflingen unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen für Fragestellungen aus dem Bereich des sogenannten Energy Ratings.

Im Bereich der Quantenradiometrie wurde das EMPIR-Projekt „Optical metrology for quantum-enhanced secure telecommunication“ (MIQC2) erfolgreich abgeschlossen. Aktivitäten im diesem Projekt umfassten unter anderem auch Vergleichsmessungen für die Detektionseffizienz von Silizium-Single-Photon Avalanche Dioden (Si-SPAD) (Freistrahl, 850 nm) und InGaAs-SPAD Detektoren (Faser-gebunden, 1550 nm) sowie für die Korrelationsmessungen 2. Ordnung von Einzelphotonenquellen. Bei allen diesen Messvergleichen wurde eine gute Konsistenz in den Messergebnissen erzielt.

Zeit und Frequenz

Im Themenbereich Zeit und Frequenz ist einer der Schwerpunkte die Weiterentwicklung optischer Uhren, dazu gehört insbesondere auch die Realisierung ultrastabiler Laser und Resonatoren.

Zur Realisierung höchster Uhrenstabilitäten sind ultrastabile Laser erforderlich. Die PTB besitzt den derzeit weltweit stabilsten Laser, er basiert auf einem kryogenen Silizium-Resonator. Die stabilisierte Laserfrequenz wird mit hoher Verfügbarkeit über einen optischen Frequenzkamm und stabilisierte Glasfaserverbindungen den aktuellen optischen Sr- und Yb^+-Uhren und den im Aufbau befindlichen In^+- und Al^+- Uhren zur Verfügung gestellt. Es wird aber auch an der Weiterentwicklung der Resonatoren gearbeitet. So wurden neuartige kristalline GaAs/AlGaAs-Spiegelschichten mit reduziertem thermischen Rauschen erfolgreich bei 124 K getestet und werden nun für die nächste Generation ultrastabiler Silizium-Resonatoren mit Frequenzinstabilitäten von $1 \cdot 10^{17}$ eingesetzt.

Generell wird neben der Entwicklung höchststabiler Lasersysteme auch an der Betriebsfestigkeit optischer Uhren gearbeitet. Diese konnte durch die Umsetzung eines auf optischer Phasenmodulation basierenden Konzepts zur Laserkühlung atomaren Strontiums stark erhöht werden, u. a. durch die Einsparung einer Laserquelle, was einen wesentlich kompakteren Aufbau ermöglicht.

Im Rahmen der Verbesserung der Stabilität optischer Atomuhren wurde an der PTB ein neues Verfahren entwickelt, das sogenannte „Autobalanced Ramsey Verfahren“: Optische Atomuhren basieren auf der Anregung einer quantenmechanischen Überlagerung zweier atomarer Energiezuständen durch Laserpulse. Die Laserfrequenz – das Taktsignal der Uhr – wird von der Schwingung des erzeugten Überlagerungszustands gesteuert. Die Atome sind weitgehend vor Störungen aus der Umgebung isoliert. Die Taktfrequenz kann jedoch auch durch die unvermeidliche Wechselwirkung der Atome mit den anregenden Laserpulsen gestört werden. Mit einem neuen experimentellen Verfahren können solche anregungsinduzierten Fehler vollständig eliminiert werden. Durch Vergleichsmessungen zwischen zwei $^{171}Yb^{+}$-Einzelionenuhren wurde nun die Wirksamkeit des Verfahrens demonstriert.

Die PTB beteiligt sich intensiv an Frequenzvergleichen mit europäischen Partnern über Glasfaserstrecken. Mit Kollegen in Frankreich und England werden weltweit einzigartige interferometrische Glasfaserverbindungen betrieben. Hierüber werden optische Frequenzen zwischen den nationalen Metrologieinstituten der drei beteiligten Länder mit höchster Präzision ausgetauscht. 2018 wurden die optischen Atomuhren des NPL in London, des LNE-SYRTE in Paris und der PTB mit einer Unsicherheit von wenigen Teilen in 10^{17} miteinander verglichen. Diese Arbeiten werden in den kommenden Jahren in den neu genehmigten EU-Projekten „Advanced time/frequency comparison and dissemination through optical telecommunication networks” (TiFOON) und „Optical clocks for the redefinition of the SI second“ (ROCIT) fortgeführt werden. Aber auch national wurden entscheidende Fortschritte in der Frequenzübertragung zwischen verschiedenen Standorten erreicht. So sind jetzt präzisere Frequenzvergleiche zwischen der PTB und dem Max-Planck-Institut in Garching möglich. Um

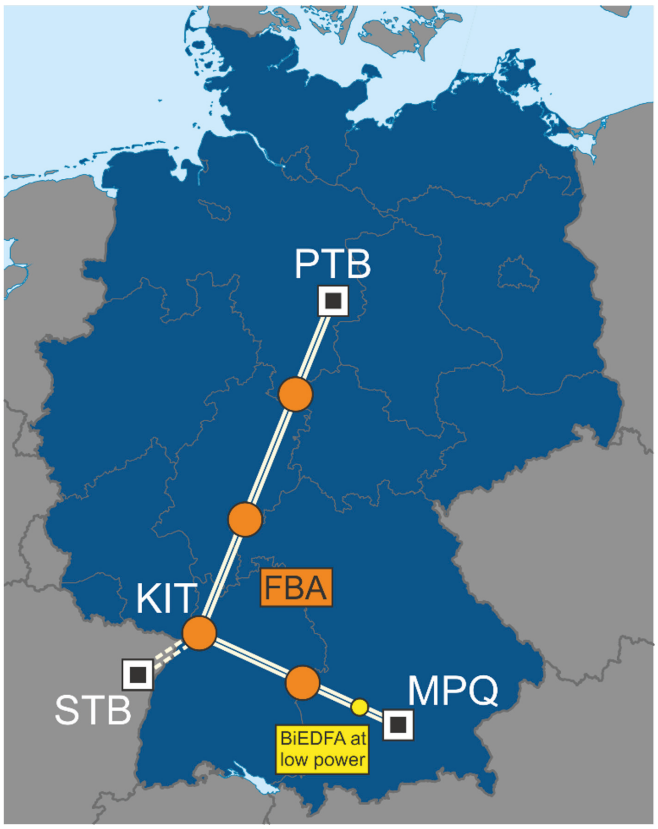


Bild 12: Die Glasfaserverbindung PTB-KIT-MPQ, nun mit einer Unsicherheit << 10^{-18}

die Dämpfung im 340 km langen Teilstück zwischen dem Karlsruhe Institut of Technology (KIT) und dem MPQ zu kompensieren (und damit die Gesamtstrecke PTB-MPQ zu realisieren), wurde ein weiterentwickelter Faser-Brillouin-Verstärker in Ulm installiert, siehe Bild 12. Dieser ersetzt frühere Erbium-dotierte Faserverstärker und ermöglicht nun die zuverlässige Übertragung einer optischen Frequenz von der PTB zum MPQ mit einer Unsicherheit von << 10^{-18}. Ein weiteres Ziel der Glasfaserverbindung zum MPG ist die Vorbereitung einer gemeinsamen Messung der relativistischen Rotverschiebung zwischen der PTB und dem MPQ, um daraus direkt den Höhenunterschied zwischen den beiden Instituten zu ermitteln.

Die Frequenzinstabilität und systematische Unsicherheit der neuesten Generation optischer Uhren liegt heute im Bereich von wenigen 10^{-18}. Vergleiche zwischen Atomuhren müssen den Unterschied der relativistischen Rotverschiebungen der Uhrenfrequenzen berücksichtigen, der proportional zu dem Unterschied des Schwerepotentials ist, in dem sich die Uhren jeweils befinden. Dabei setzt sich das Schwe-

repotential zusammen aus dem Gravitationspotential und dem Zentrifugalpotential, letzteres bedingt durch die Erdrotation. Für Beiträge zur Internationalen Atomzeit TAI muss eine entsprechende relativistische Korrektur angebracht werden, die sich auf ein vereinbartes Nullpotential bezieht, das vom mittleren Meeresspiegel oder Geoid abgeleitet wird. Um die von optischen Uhren erreichten Unsicherheiten ausnutzen zu können, muss das Schwerepotential mit einer Genauigkeit von 0,1 m^2/s^2 bestimmt werden, was einer Höhendifferenz von 1 cm entspricht. In einem europäischen Forschungsprojekt wurden zwei geodätische Methoden zur Bestimmung des Schwerepotentials an verschiedenen Uhren-Standorten in Europa verwendet [H. Denker et al., Journal of Geodesy 92, 487 (2018)]: geometrisches Nivellement und die Global-Navigation-Satellite-Systems-(GNSS)/Geoid-Methode. Dabei ergibt das geometrische Nivellement über kürzere Distanzen bis zu einigen Kilometern Unsicherheiten, die Höhendifferenzen von wenigen Millimetern entsprechen. Bei größeren Distanzen können aber systematische Fehler auftreten, die Dezimetern entsprechen. Die GNSS/Geoid-Methode ergibt hingegen absolute Werte des Schwerepotentials mit einer Unsicherheit, die etwa 2 cm entspricht, und ist daher über größere Distanzen vorzuziehen.

Mit einer relativen Unsicherheit der relativistischen Rotverschiebungen von $2 \cdot 10^{-18}$ ermöglichen diese Forschungsarbeiten nun den Vergleich von Atomuhren an den Metrologieinstituten INRiM (Turin), LNE-SYRTE (Paris), NPL (London) und PTB (Braunschweig) auf dem Unsicherheitsniveau der beteiligten Uhren.

Neben der Übertragung von optischen Frequenzen über Glasfasern für Uhrenvergleichszwecke wird an der PTB ebenfalls die Möglichkeit einer Übertragung von Zeitmarken untersucht. Hierbei ist es in Zusammenarbeit mit polnischen Kollegen der AGH (*Akademia Górniczo-Hutnicza*) University of Science and Technology in Krakau gelungen, zum ersten Mal gleichzeitig phasenstabilisierte Referenzfrequenzen im optischen Frequenzbereich (194 THz) gemeinsam mit einer Radiofrequenz (10 MHz) und einer von UTC abgeleiteten Zeitmarke (1 pps) über eine 100 km lange Glasfaser zu übertragen, sodass damit alle notwendigen Referenzfrequenzen für Präzisionsexperimente einem weit entfernten Anwender zur Verfügung gestellt werden können.

Die Arbeiten an der optischen Kernuhr werden kontinuierlich fortgeführt. Hintergrund der Aktivitäten

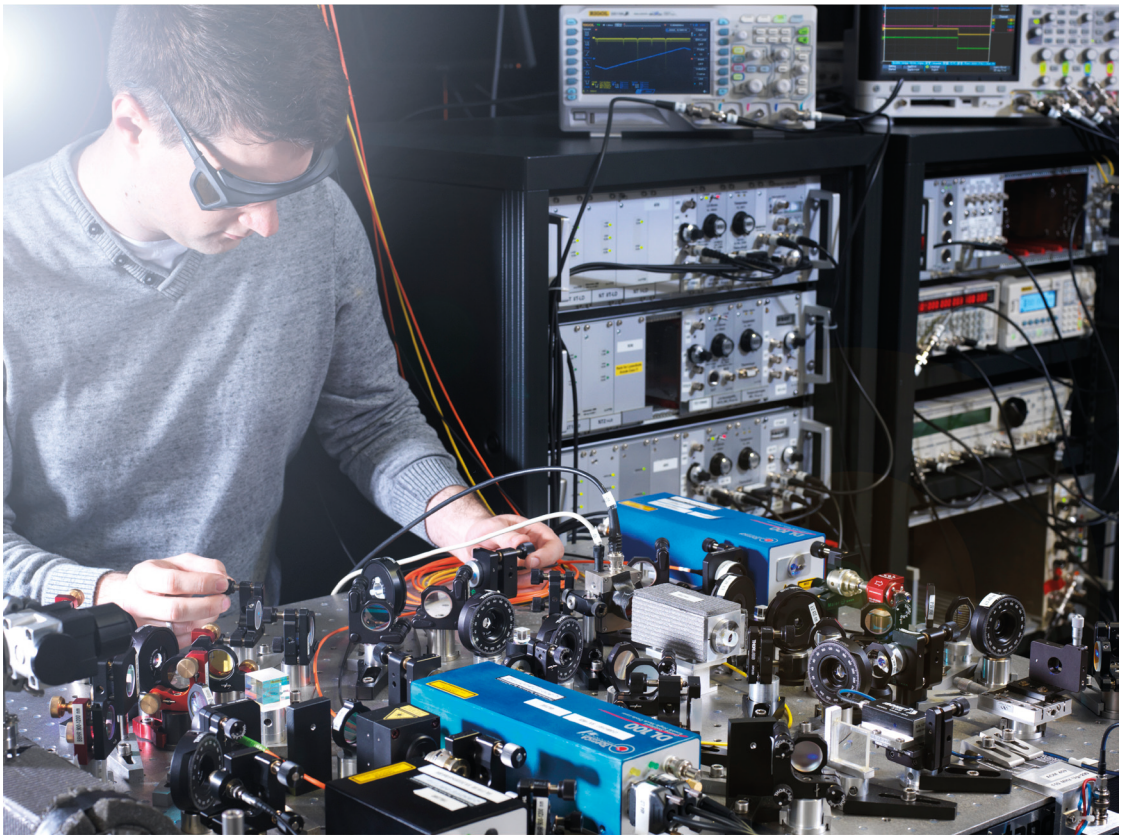


Bild 13: Laseraufbau für das Thorium-Kernuhr-Experiment

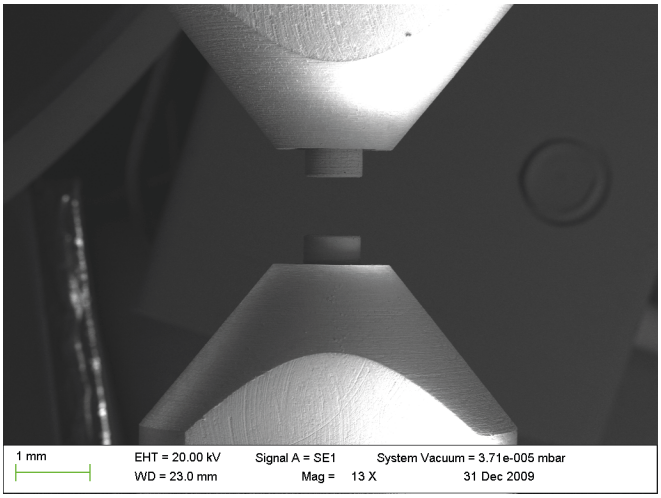


Bild 14: Fallenelektroden für die im Rahmen des QUTEGA-Pilotprojektes „Opticlock“ entwickelte Endkappenfalle

an der PTB und generell auch weltweit ist, dass der Atomkern Thorium-229 eine unter allen bekannten Nukliden einmalige Eigenschaft besitzt, dass es möglich sein sollte, ihn mit ultraviolettem Licht anzuregen. Über den dafür verantwortlichen niederenergetischen Zustand des Th-229-Kerns war bisher nur wenig bekannt. Nun ist es erstmals in einer Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilians-Universität München, dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt, dem Helmholtz-Institut Mainz und der Johannes Gutenberg-Universität Mainz gelungen, die Form der Ladungsverteilung dieses Kernzustands mithilfe von spektroskopischen Untersuchungen an der Elektronenhülle zu bestimmen [J. Thielking et al., Nature 556, 321 (2018)]. Damit bietet sich ein Weg, eine Laseranregung des Atomkerns zu kontrollieren und somit eine optische Kernuhr zu realisieren, die prinzipiell noch genauer „tickt“ als heutige (optische) Atomuhren.

Ein weiterer Schwerpunkt der Aktivitäten lag in dem gemeinsam mit der Industrie im Rahmen des QUTEGA-Pilotprojektes „Opticlock“ zu entwickelnden Prototypen einer optischen Atomuhr basierend auf dem Quadrupolübergang im $^{171}Yb^{+}$-Ion. Insbesondere ging es um ein verbessertes Design der Endkappen-Falle, siehe Bild 14, eine massive Halterung der Fallenelektroden als thermische Senke sowie um die Realisierung einer kompakten Vakuumkammer, siehe Bild 15. Derzeit findet der Test-Uhrenbetrieb, noch mit PTB-Lasern, statt. Im kommenden Jahr ist die Integration aller Subsysteme und Charakterisierung der Uhr geplant.

Auch auf dem Gebiet der Mikrowellen-basierten Atomuhren, die die primäre Realisierung der Sekunde darstellen, werden kontinuierlich Fortschritte gemacht. Basierend auf neuesten Erkenntnissen wurden die primären Caesium-Fontänenuhren der PTB, CSF1 und CSF2, erneuten umfangreichen Untersuchungen

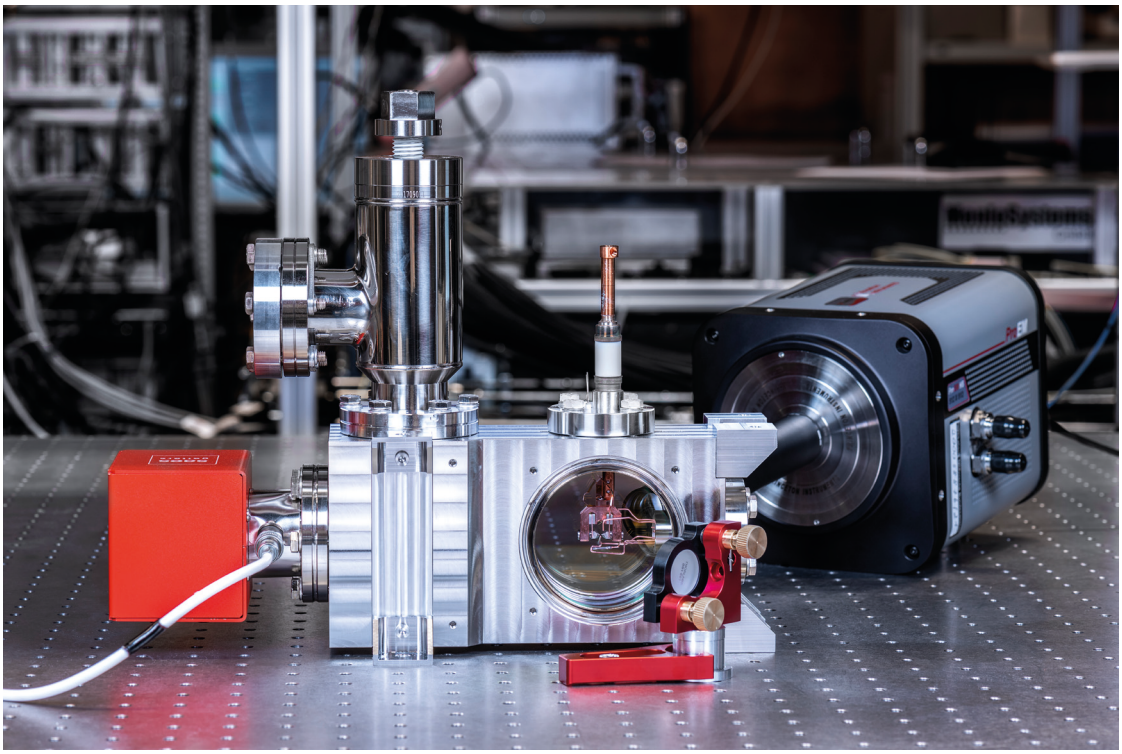


Bild 15: Die im Rahmen des QUTEGA-Pilotprojektes „Opticlock“ entwickelte Ionenfalle mit Vakuumkammer

Bild 16: Antennenfelder in Warschau (oben) und Pretoria (unten)

ihrer frequenzverschiebenden Effekte unterzogen [S. Weyers et al., Metrologia 55, 789 (2018)]. Dazu wurden neue Techniken sowohl zur empfindlichen Detektion als auch zur Unterdrückung von Frequenzverschiebungen entwickelt und eingesetzt. Das Ergebnis sind reduzierte relative Frequenzunsicherheiten von $2{,}7 \cdot 10^{-16}$ für CSF1 und $1{,}7 \cdot 10^{-16}$ für CSF2, womit beide Uhren neben wenigen anderen Fontänenuhren zur internationalen Spitze gehören. CSF1 und CSF2 dienen zur Steuerung der internationalen Atomzeitskala TAI und der nationalen Atomzeitskala UTC(PTB), die die Grundlage für die gesetzliche Zeit in Deutschland bildet. Weitere wichtige Anwendungen sind Absolutfrequenzmessungen optischer Uhren für die Vorbereitung einer Neudefinition der Sekunde und die Untersuchung fundamentaler physikalischer Fragestellungen, wie der nach zeitlichen Variationen von Fundamentalkonstanten.

Die PTB unterstützt das BIPM bei der Kalibrierung der Signallaufzeiten von GPS-Signalen in den für internationale Zeitvergleiche verwendeten Empfängern verschiedener Institute, vornehmlich in Europa, siehe Bild 16. So wurden im Jahr 2018 Empfänger in den geodätischen Observatorien Wettzell und Kornik (Polen) und in den Metrologieinstituten Tschechiens, Litauens und Polens kalibriert. Für insgesamt 7 Empfänger konnte eine Kalibrierunsicherheit von < 2,2 ns (1 s) erreicht werden. Aktuell wird der Empfänger in Pretoria (Südafrika) betrieben, bevor er gegen Ende des Jahres voraussichtlich nach Ägypten verschickt wird. In diesem Zusammenhang lässt sich sagen, dass die PTB weltweit für eine genaue Zeit sorgt.

Eine wesentliche Technik für hochgenaue Zeitvergleiche im Kontext der Realisierung der „Koordinierten Weltzeit“ UTC ist der Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT). In Zusammenarbeit von insgesamt 17 Institutionen wurde ein Konzept zur Reduzierung der statistischen Messunsicherheit entwickelt und umgesetzt [Z. Jiang et al., Metrologia 55, 685 (2018)]. Es basiert auf Entwicklungen, sogenannter Software-Defined Radio Receivers, die ursprünglich am japanischen NICT begannen und am Zeitinstitut Taiwans bis zur praktischen Verwendbarkeit gebracht wurden. Im Ergebnis konnte die Standardabweichung aufeinanderfolgender stündlicher Vergleichsmessungen, z. B. zwischen der PTB und dem Observatoire de Paris, von 0,4 ns auf 0,1 ns reduziert werden.

Auch in weiteren Bereichen der direkten Dienstleistung für die Gesellschaft wurden Fortschritte erzielt. Im Rahmen von Akkreditierungen nach DIN EN ISO/IEC 17025 ist die Rückführung eines als Frequenznormal betriebenen disziplinierten Oszillators (DO) auf

gesetzliche Einheiten wichtig. Als Referenzen können die Zeitsignale von GPS, Galileo oder des Langwellensenders DCF77 dienen. Die Anwendung der in diesem Zusammenhang relevanten Informationen aus dem PTB Time Service Bulletin wurde in [D. Piester, Technisches Messen 85, 268 (2018)] detailliert beschrieben. Hierbei wurde festgestellt, dass die größten für den Anwender in Kalibrierlaboren wichtigen auftretenden Unsicherheitsbeiträge typischerweise von der Instabilität der verwendeten Oszillatoren stammen. Gegenstand weiterer Untersuchungen sind die beobachteten systematische Abweichungen von 2 ns – 3 ns zwischen Vorhersagen aus den in der von Galileo-Satelliten gesendeten Navigationsnachricht mit den in der PTB mittels kalibrierter Empfänger erhaltenen Messwerten, deren Ursache in den unterschiedlichen Methoden der Ermittlung der Signallaufzeiten in den Empfängern liegt.

Am QUEST-Institut der PTB lag ein Hauptaugenmerk auf der Weiterentwicklung von unterstützenden Verfahren zur Verbesserung optischer Uhren. So wurde ein Lasersystem zur Anregung des stark verbotenen Oktupolübergangs in ^{172}Yb-Ionen fertiggestellt. Herzstück des Aufbaus ist ein ultrastabiler Laser bei 934 nm, der über eine optische Glasfaserverbindung vom Kopfermann-Bau in den Giebe-Bau transferiert wird. Der dann leistungsverstärkte, gemäß der Isotopenverschiebung zwischen ^{171}Yb und ^{172}Yb in seiner Frequenz angepasste und auf 467 nm frequenzverdoppelte Laser dient zum Test der Lorentzinvarianz in einem Coulomb-Kristall.

Im vergangenen Jahr wurde ein bedeutender Meilenstein auf dem Weg zur transportablen Al^+-Quantenlogik-Uhr erreicht, die zukünftig auch für die Bestimmung von Höhenunterschieden in der Geodäsie eingesetzt werden soll. Sowohl Grundzustandskühlen als auch Zustandskontrolle von gefangenen Ionen wurden demonstriert, und der experimentelle Aufbau wurde charakterisiert. Die Unsicherheiten in den residuellen Frequenzverschiebungen lassen eine Höhenauflösung im Bereich von wenigen cm erwarten. Ferner wurde für die transportable Al^+-Quantenlogik-Uhr der Uhrenlaser in Betrieb genommen. Dies geschah im Rahmen der Kooperation „Timing the future: micro-integrated lasers for next generation portable optical atomic clocks“ (SAW-2013-FBH-3) zwischen dem Ferdinand-Braun-Institut (Berlin), der Humboldt-Universität zu Berlin und dem QUEST-Institut der PTB. Ein hybrider mikrointegrierter Laser wurde erfolgreich in Betrieb genommen und getestet. Der Laser zeichnet sich durch sehr gute optische Eigenschaften bei gleichzeitig besonders kompakten Maßen und einem sehr robusten mechanischen Aufbau aus, was eine weitere Voraussetzung für den zukünftigen Einsatz als Uhrenlaser für die transportable Al^+-Quantenlogik-Uhr ist.

Für die derzeit in der Entwicklung befindliche Multi-Ionen-Indiumuhr wurde ein Nd:YAG-Laser bei 946 nm mithilfe einer selbstentwickelten, digitalen Pound-Drever-Hall-Regelung inklusive Mischer und Phasenanpassung mit einer relativen Kurzzeitstabilität von $1{,}1 \cdot 10^{-16}$ in 1 s auf einen ULE-Resonator stabilisiert, siehe Bild 17. Im Anschluss wurde, in Kollaboration mit dem Fachbereich 4.3, ein Transferlock auf einen kryogenen Silizium-Resonator realisiert, um eine Langzeitstabilität im 10^{-17} Bereich zu erreichen. Es wurden auch erstmalig Ionen in einem neuen unmagnetischen Messaufbau für Multi-Ionen-Uhren gefangen und detektiert, was einen bedeutsamen

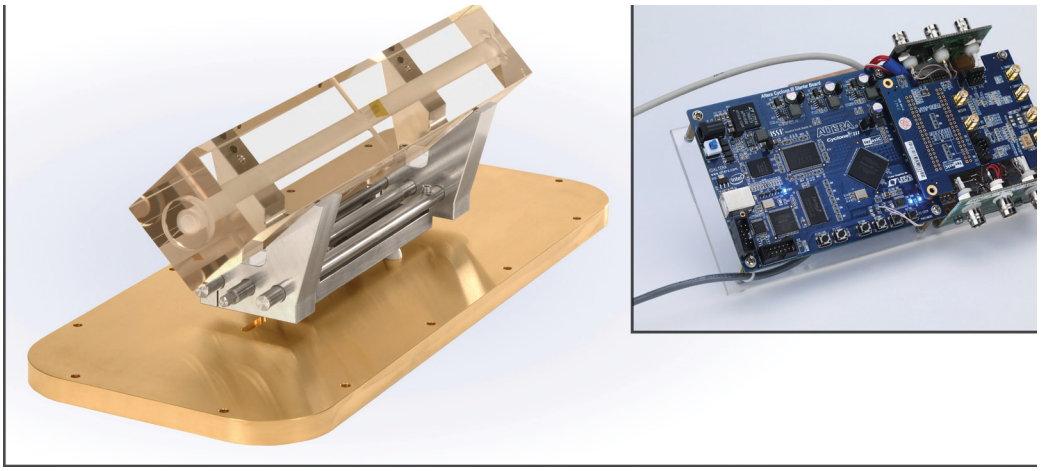


Bild 17: Digitale Stabilisierung des Uhrenlasers für die Indium-Spektroskopie. Ein Nd:YAG-Laser bei 946 nm wurde auf einen 30 cm langen ULE-Resonator mit einer relativen Kurzzeitstabilität von $1{,}1 \cdot 10^{-16}$ in 1 s stabilisiert (linkes Bild). Die gesamte elektronische Regelung dafür, inklusive Mischer, Phasenschieber und PID Regler, wurde in einem selbstentwickelten digitalen Schaltkreis mit einem FPGA realisiert (rechtes Bild).

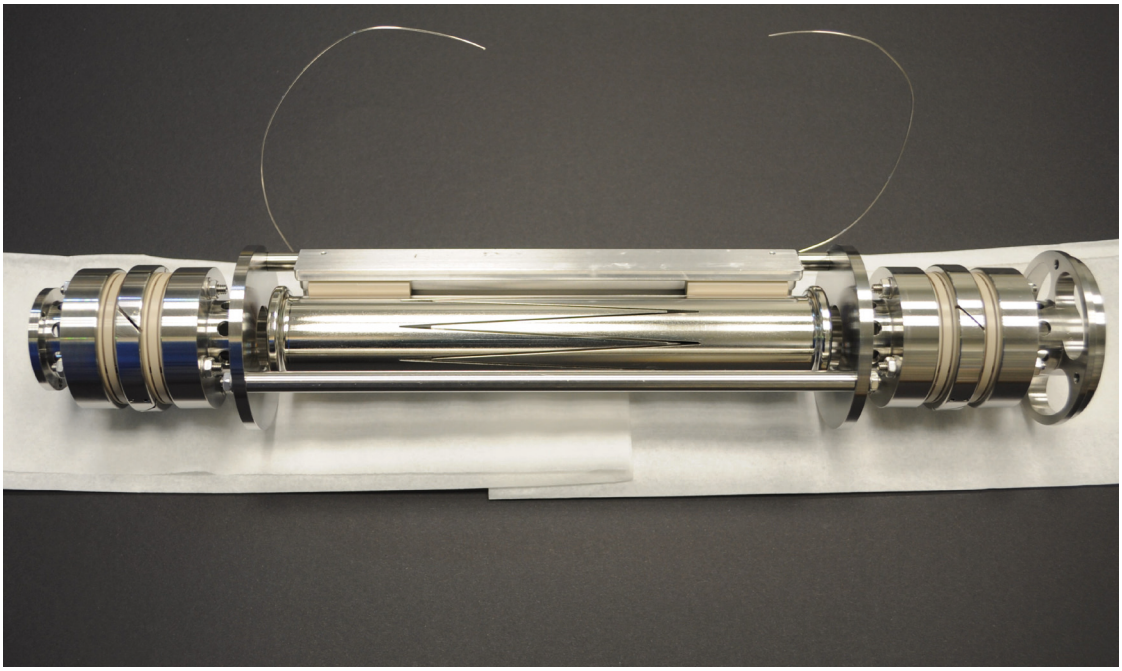


Bild 18: Ionenoptik im Strahlengang zum Abbremsen von hochgeladenen Ionen. Sikler-Linsen (links, rechts) und gepulste Driftröhren (Mitte) werden eingesetzt um den Ionenstrahl abzulenken, zu bündeln und abzubremsen.

Schritt in Richtung der Realisierung und Inbetriebnahme einer weltweit ersten Multi-Ionen-Uhr mit einer angestrebten relativen Frequenzunsicherheit unterhalb von 10^{-18} darstellt. Nach dem Einbau einer segmentierten Chipfalle aus Aluminiumnitrid in die Kammer und dem Aufbau der Elektronik und Optik wurden die ersten lasergekühlten In^+- und Yb^+-Ionen-Coulombkristalle beobachtet.

Im bereits erwähnten OptiClock-Projekt wurde eine neue Chipfalle für den Multi-Ionen-Betrieb für den Demonstrator einer ersten kommerzialisierbaren optischen Ionenuhr entwickelt. Basierend auf einem früheren Design, welche eine Uhrenspektroskopie mit einer Genauigkeit von 10^{-19} ermöglicht, ist die neue Falle kompakter und wird in Kollaboration mit dem wissenschaftlichen Gerätebau der PTB (Fachbereich 5.5) einem vereinfachten Herstellungsprozess folgen. Eine erste Testversion wurde bereits gefertigt.

Hochgeladene Ionen eignen sich für besonders empfindliche Tests fundamentaler Physik und für optische Uhren. Allerdings war die Spektroskopie bislang durch die hohen Temperaturen in der Produktionseinheit (Elektronenstrahlfalle) limitiert. Für die Präzisionsspektroskopie von hochgeladenen Ionen müssen diese Ionen in eine kryogene Paulfalle überführt werden, wo sie über die Coulomb-Wechselwirkung von dort gefangenen Beryllium Ionen gekühlt werden, siehe Bild 18. In einer Kollaboration mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg ist es am QUEST-Institut gelungen diesen wichtigen Schritt zu implementieren, der es erlaubt, in naher Zukunft die erreichbare relative Unsicherheit der Frequenzmessung optischer Übergänge in hochgeladenen Ionen um 10 Größenordnungen zu verringern.

Eine wichtige Voraussetzung für Quantenlogikspektroskopie an hochgeladenen Ionen ist die Präparation der Ionen im quantenmechanischen Grundzustand der Bewegung. In einer Kollaboration mit dem MPIK ist es am QUEST-Institut erstmalig gelungen, einen Kristall bestehend aus einem Beryllium-Ion und einem hochgeladenen Argon-Ion (Ar^{13+}) in zwei von sechs Bewegungsmoden in den Grundzustand zu kühlen, siehe Bild 19. Dies ermöglicht die Suche nach dem magnetischen Dipolübergang bei 441 nm in Ar^{13+}.

Ferner wurden im Frühjahr 2018 erstmals $^9Be^+$-Ionen in einer mehrlagigen Oberflächen-Ionenfalle gefangen, siehe Aufmacherbild und Bild 20. Der Prozess zur Herstellung dieser Fallen wurde in den letzten

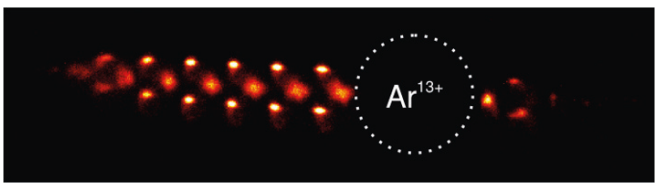


Bild 19: Ein einzelnes gefangenes hochgeladenes Ar^{13+} Ion, durch Wechselwirkung mit einem lasergekühlten Be^+ Ionenkristall auf mK-Temperaturen gekühlt

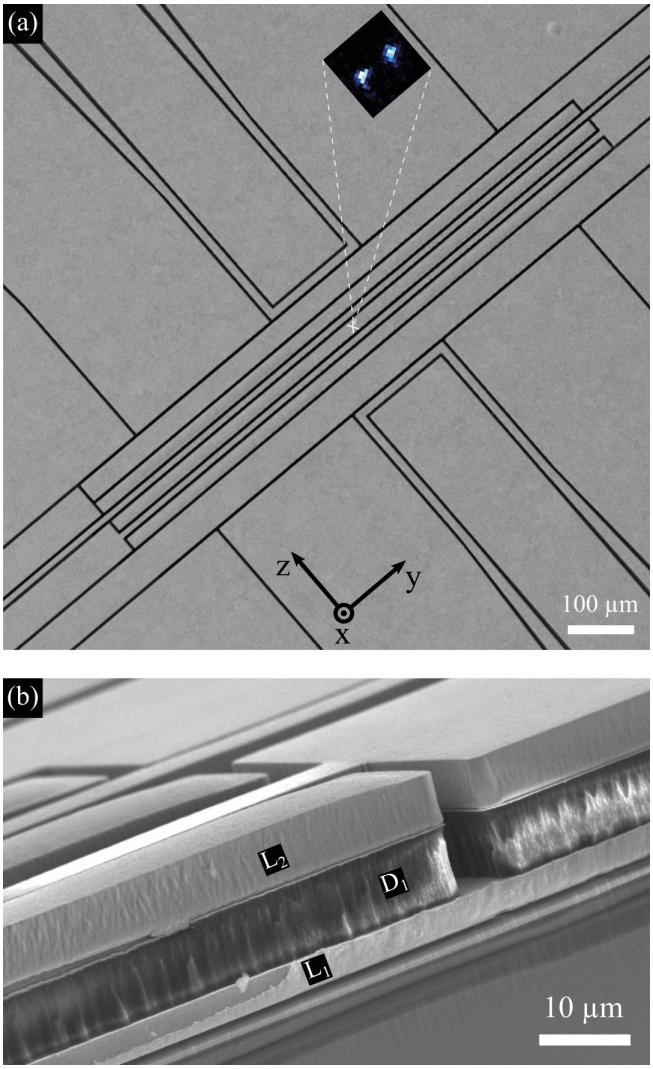


Bild 20: Aufnahme des Fallenzentrums einer mehrlagigen Ionenfalle mittels Rasterelektronenmikroskopie. a) Oberste Metall-Ebene (L_1) der Ionenfalle. Die einzelnen $^9Be^+$-Ionen werden 35 µm oberhalb von L_1 gefangen (kleines Bild). Der Abstand (schwarze Linien) zwischen den Elektroden ist ungefähr 5 µm. b) Seitenansicht einer mehrlagigen Stelle innerhalb der Ionenfalle. Die zwei Metall-Ebenen L_1 und L_2 sind durch ein Dielektrikum D_1 voneinander elektrisch isoliert, können aber wie bei einer mehrlagigen Leiterkarte mittels Durchkontaktierungen miteinander verbunden werden.

Jahren an der PTB entwickelt und erlaubt es, elektrische Kontrollsignale in „vergrabenen“ Schichten der Struktur zu führen, während die Ionen durch die Potentiale auf der obersten Schicht kontrolliert werden. Die Technologie wurde entwickelt für Quantensimulatoren und zukünftige Quantencomputer.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

Grundlagen der Metrologie

Charakterisierung der Transmissionsspektren von nano-strukturierten geführten-Mode-Resonanz-Mikrofarbfiltern
Im Rahmen einer Kooperation der TU Braunschweig, des Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA) und der PTB wurden nanostrukturierte Mikrofarbfilter basierend auf periodischen Subwellenlängen-Metallgittern entwickelt. Mit einem speziell designten Mikroskop-Spektrometer für den UV-NIR-Spektralbereich wurden die Transmissionsspektren der 10 µm × 10 µm kleinen Filter gemessen und mit rigorosen Simulationsrechnungen verglichen. Die geringe spektrale Breite bei niedrigen Seitenbandintensitäten dokumentiert die Eignung als schmalbandige effiziente Mikrofarbfilter. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Ein neues Auswerteverfahren für die Mueller-Ellipsometrie
In der PTB wurde ein neues mathematisches Verfahren entwickelt, mit dem Messdaten eines Mueller-Ellipsometers ausgewertet werden. Anders als bislang üblich, wird nun die Depolarisation des Lichtes, die durch den Prüfling verursacht wird, benutzt, um ein Maß für die Unsicherheit des nicht-depolarisierten Anteils abzuleiten. Bei den spektralen Messungen mit einem Mueller-Ellipsometer führt dies zu einer neuartigen Gewichtung der einzelnen Wellenlängenbeiträge zum Gesamtergebnis. Das Verfahren wird beispielsweise angewendet, um Geometrieparameter von Subwellenlängenstrukturen zu bestimmen. (M. Wurm, FB 4.2, matthias.wurm@ptb.de)

Schwingungsisolation für die Si-28-Gitterparametermessung
Der Gitterparameter von Si-28 wird im Rahmen der Kristalldichtemethode für die Neudefinition der SI-Masseneinheit kg mit einem Röntgeninterferometer gemessen. Dazu ist eine stabile Relativposition der beiden separaten Teilkristalle aus Si-28 von wenigen 10 pm erforderlich. Dieses Ziel wird durch aktive und passive Dämpfungen, Isolationen und Regelungen erreicht. Die neunstufige Abfolge dieser Maßnahmen bekämpft gebäudeexterne und -interne Bodenschwingungen, Raumschall und Körperschall des Aufbaus selbst in einem Frequenzbereich von 0,2 Hz bis 200 Hz. Ergänzend wird der Luftstrom der Klimatisierung so weit wie möglich beruhigt. (U. Kuetgens, FB 4.2, ulrich.kuetgens@ptb.de)

Gleichzeitige Übertragung ultrastabiler optischer Frequenzen, Radiofrequenzen und Zeitmarken
In Zusammenarbeit mit polnischen Kollegen der AGH University of Science and Technology in Krakau wurden zum ersten Mal phasenstabilisierte Referenzfrequenzen im optischen Frequenzbereich (194 THz) gemeinsam mit einer Radiofrequenz (10 MHz) und einer von UTC abgeleiteten Zeitmarke (1 pps) über eine 100 km lange Glasfaser übertragen, sodass damit alle notwendigen Referenzfrequenzen für Präzisionsexperimente einem weit entfernten Anwender zur Verfügung gestellt werden können. (H. Schnatz, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

Kristalline Spiegel bei kryogenen Temperaturen charakterisiert
Neuartige kristalline GaAs/AlGaAs-Spiegelschichten mit reduziertem thermischen Rauschen wurden erfolgreich bei 124 K getestet und werden nun für die nächste Generation ultrastabiler Silizium-Resonatoren mit Frequenzinstabilitäten von $1 \cdot 10^{-17}$ eingesetzt. (T. Legero, FB 4.3, thomas.legero@ptb.de)

Ultrastabiler Laser für optische Uhren der PTB verfügbar
Die weltweit stabilste, auf einen kryogenen Silizium-Resonator stabilisierte Laserfrequenz wird mit hoher Verfügbarkeit über einen optischen Frequenzkamm und stabilisierte Glasfaserverbindungen den aktuellen optischen Sr- und Yb^+-Uhren und den im Aufbau befindlichen In^+- und Ar^{13+}-Uhren zur Verfügung gestellt, um die höchsten Uhrenstabilitäten zu erreichen. (E. Benkler, FB 4.3, erik.benkler@ptb.de)

Photonenstreuung in optischen Gitteruhren
An einer Strontium-Gitteruhr der PTB wurde die nichtresonante Streuung von Licht des optischen Gitters durch kalte Atome experimentell untersucht und die Auswirkungen derartiger Prozesse auf Gitteruhren untersucht, die v. a. aus dem Verlust der atomaren Kohärenz resultieren. (S. Dörscher, FB 4.3, soeren.doerscher@ptb.de)

Hochgradig betriebsfeste Lasersysteme für Gitteruhren
Die Umsetzung eines neuen, auf optischer Phasenmodulation basierenden Konzepts für Lasersysteme zur Kühlung atomaren Strontiums hat die Betriebsfestigkeit der Gitteruhren der PTB stark erhöht und, u. a. durch die Einsparung einer Laserquelle, einen wesentlich kompakteren Aufbau ermöglicht. (R. Schwarz, FB 4.3, roman.4.schwarz@ptb.de)

Interferometrische Glasfaserverbindung zwischen Karlsruhe und Garching
Die PTB hat die bestehende interferometrische Glasfaserverbindung nach Straßburg um einen neuen 340 km langen Zweig vom Knotenpunkt Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zum Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching erweitert und eine gemeinsame Messung der relativistischen Rotverschiebung zwischen der PTB und dem MPQ vorbereitet, um daraus direkt den Höhenunterschied zwischen den beiden Instituten zu ermitteln. (T. Waterholter, FB 4.3, thomas.waterholter@ptb.de)

Weiterentwickelter Faser-Brillouin-Verstärker ermöglicht präzise Frequenzvergleiche zwischen der PTB und dem Max-Planck-Institut in Garching
Um die Dämpfung im 340 km langen Teilstück KIT-MPQ der neuen Strecke PTB-MPQ zu kompensieren, wurde ein weiterentwickelter Faser-Brillouin-Verstärker in Ulm installiert. Dieser ersetzt frühere Erbium-dotierte Faserverstärker und ermöglicht nun die zuverlässige Übertragung einer optischen Frequenz von der PTB zum MPQ mit einer Unsicherheit von $<< 10^{-18}$. (A. Kuhl, FB 4.3, alexander.kuhl@ptb.de)

Internationale Vergleiche optischer Uhren
Mit Kollegen in Frankreich und England betreibt die PTB ein weltweit einzigartiges Netz interferometrischer Glasfaserverbindungen: Hierüber tauschen die nationalen Metrologieinstitute der drei Länder höchstpräzise optische Frequenzen aus. 2018 wurden die optischen Atomuhren des NPL in London, des LNE-SYRTE in Paris und der PTB mit einer Unsicherheit von wenigen Teilen in 10^{17} miteinander verglichen. Die Arbeiten sollen in neu genehmigten EU-Projekten TiFOON und ROCIT fortgeführt werden. (S. Dörscher, soeren.doerscher@ptb.de, S. Koke, sebastian.koke@ptb.de, FB 4.3)

Neuevaluation der Fontänenuhren
Basierend auf neuesten Erkenntnissen und Methoden wurden die modifizierten primären Caesium-Fontänenuhren der PTB, CSF1 und CSF2, erneut umfangreichen Untersuchungen ihrer frequenzverschiebenden Effekte unterzogen. Das Ergebnis sind reduzierte relative Frequenzunsicherheiten von $2{,}7 \cdot 10^{-16}$ für CSF1 und $1{,}7 \cdot 10^{-16}$ für CSF2, womit beide Uhren neben wenigen anderen Fontänenuhren zur internationalen Spitze gehören. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

Genaue Zeit auch am anderen Ende der Welt
Die PTB unterstützt das BIPM bei der Kalibrierung der Signallaufzeiten von GPS-Signalen in den für internationale Zeitvergleiche verwendeten Empfängern verschiedener Institute, vornehmlich in Europa. So wurden im Jahr 2018 Empfänger in den geodätischen Observatorien Wettzell und Kornik (Polen) und in den Metrologieinstituten Tschechiens, Litauens und Polens kalibriert. Für insgesamt 7 Empfänger konnte eine Kalibrierunsicherheit von < 2,2 ns (1 s) erreicht werden. Aktuell wird der Empfänger in Pretoria (Südafrika) betrieben, bevor er gegen Ende des Jahres voraussichtlich nach Ägypten verschickt wird. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Software-Defined Radio Receivers in TWSTFT
Two-way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) ist eine wesentliche Technik für hochgenaue Zeitvergleiche im Kontext der Realisierung der Koordinierten Weltzeit UTC. In Zusammenarbeit von insgesamt 17 Institutionen wurde ein Konzept zur Reduzierung der statistischen Messunsicherheit entwickelt und umgesetzt [Z. Jiang et al., Metrologia **55**, 685 (2018)]. Es basiert auf Entwicklungen, die ursprünglich am japanischen NICT begannen und am Zeitinstitut Taiwans bis zur praktischen Verwendbarkeit gebracht wurden. Im Ergebnis konnte die Standardabweichung aufeinanderfolgender stündlicher Vergleichsmessungen z. B. zwischen der PTB und dem Observatoire de Paris von 0,4 ns auf 0,1 ns reduziert werden. (D. Piester, FB 4.4, dirk.piester@ptb.de)

Autobalanced Ramsey-Verfahren für optische Atomuhren
Optische Atomuhren basieren auf der Anregung einer quantenmechanischen Überlagerung von zwei atomaren Energiezuständen durch Laserpulse. Die La-

serfrequenz – das Taktsignal der Uhr – wird von der Schwingung des erzeugten Überlagerungszustands gesteuert. Die Atome sind weitgehend vor Störungen aus der Umgebung isoliert. Die Taktfrequenz kann jedoch auch durch die unvermeidliche Wechselwirkung der Atome mit den anregenden Laserpulsen gestört werden. Mit einem neuen experimentellen Verfahren können solche anregungsinduzierten Fehler vollständig eliminiert werden. Durch Vergleichsmessungen zwischen zwei $^{171}Yb^{+}$-Einzelionenuhren wurde die Wirksamkeit des Verfahrens demonstriert. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

Kopplung zwischen Kern und Elektron erlaubt spektroskopische Untersuchung von Thorium-229
Der Atomkern Thorium-229 besitzt eine unter allen bekannten Nukliden einmalige Eigenschaft: Es sollte möglich sein, ihn mit ultraviolettem Licht anzuregen. Über den dafür verantwortlichen niederenergetischen Zustand des Th-229-Kerns war bisher nur wenig bekannt. Nun ist es erstmals gelungen, die Form der Ladungsverteilung dieses Kernzustands mithilfe von spektroskopischen Untersuchungen an der Elektronenhülle zu bestimmen. Damit bietet sich ein Weg, eine Laseranregung des Atomkerns zu kontrollieren und somit eine optische Kernuhr zu realisieren. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

Europäische Pilotstudie zur Korrelationsfunktion zweiter Ordnung von Einzelphotonenquellen und zur Detektionseffizienz von InGaAs-SPAD-Detektoren
Im Rahmen des EMPIR-Projektes 14IND05 MIQC2 – Optical metrology for quantum-enhanced secure telecommunication – wurden von vier europäischen Metrologieinstituten (CMI, INRIM, NPL und PTB) zum ersten Mal die Messkapazitäten zur Bestimmung der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}(0)$ von Einzelphotonenquellen (basierend auf NV-Zentren und auf *parametric down conversion*) und der Detektionseffizienz von Einzelphotonendetektoren (InGaAs-SPAD) verglichen. Eine sehr gute Konsistenz ($E_n < 0{,}6$) zwischen den Ergebnissen der Teilnehmer wurde erreicht. (M. Lopez, FB 4.5, marco.lopez@ptb.de)

Quantenverstärkte Messungen mit Bewegungs-Fockzuständen von gefangenen Ionen
In Zusammenarbeit mit Forschern der Leibniz-Universität Hannover und des LENS in Florenz wurde am QUEST-Institut der PTB ein Verfahren entwickelt, um mithilfe von nicht-klassischen Zuständen Kräfte auf ein einzelnes gefangenes Ion zu messen. Mit demselben Ausgangszustand konnte gezeigt werden, dass das erreichte Signal-zu-Rausch Verhältnis das Standard-Quantenlimit sowohl für Phasen- als auch für Amplitudenmessungen übersteigt. Mögliche Anwendungen sind die Quantenlogikspektroskopie oder Massenmessungen atomarer Teilchen. (F. Wolf, P. O. Schmidt, QUEST, fabian.wolf@ptb.de, piet.schmidt@ptb.de)

Entwicklung von Methoden zur Produktion von Einmoden-Glasfasern für die Transmission von ultravioletter Laserstrahlung
Am QUEST-Institut der PTB wurde in Zusammenarbeit mit Fachbereich 5.5 ein Wasserstoff-Druckbehälter entwickelt, in dem Einmoden-Glasfasern behandelt werden können, um UV-induzierte Degradation zu verhindern. Des Weiteren wurde ein Verfahren zum Konfektionieren der Fasern erarbeitet. Damit können alle notwendigen Schritte vom Kauf der bloßen Faser zur anwendungsfertigen Steckerleitung an der PTB realisiert werden. Die Fasern werden am QUEST-Institut genutzt, um UV-Laserstrahlung für die Kühlung und Manipulation von gefangenen Ionen von der Laserquelle zur Vakuumapparatur zu leiten. (F. Wolf, P. Schmidt, QUEST, fabian.wolf@ptb.de, piet.schmidt@ptb.de)

Lasersystem für Oktupolspektroskopie in Ytterbium-172-Ionen
Am QUEST-Institut wurde ein Lasersystem zur erstmaligen Anregung des stark verbotenen Oktupolübergangs in Yb-172-Ionen fertiggestellt. Herzstück des Aufbaus ist ein ultrastabiler Laser bei 934 nm (E. Peik, FB 4.4), der über eine optische Glasfaserverbindung vom Kopfermann-Bau in den Giebe-Bau transferiert wird. Der dann leistungsverstärkte, gemäß der Isotopenverschiebung zwischen Yb-171 und Yb-172 in seiner Frequenz angepasste und auf 467 nm frequenzverdoppelte Laser dient zum Test der allgemeinen Relativitätstheorie in einem Coulomb-Kristall. (A. P. Kulosa, D. Kalincev, C.-H. Yeh, L. Schomburg und T. E. Mehlstäubler, andre.kulosa@ptb.de, tanja.mehlstaeubler@ptb.de)

Erste Ionen im neuen unmagnetischen Messaufbau für Multi-Ionen-Uhr gefangen und detektiert
Am QUEST-Institut wurde mit dem Aufbau einer Vakuumkammer aus Titan der Grundstein für die Inbetriebnahme einer weltweit ersten Multi-Ionen-Uhr mit einer angestrebten relativen Frequenzunsicherheit unterhalb von 10^{-18} gelegt. Nach dem Einbau einer segmentierten Chipfalle aus Aluminiumnitrid in die Kammer und dem Aufbau der Elektronik und Optik wurden die ersten lasergekühlten In^+- und Yb^+-Ionen-Coulombkristalle gefangen.
(T. Nordmann, J. Kiethe, A. Didier, N. Hausser und T. E. Mehlstäubler, Tabea.Nordmann@ptb.de, Tanja.Mehlstaeubler@ptb.de)

Ultra-stabiler Laser mit digitaler Regelung erreicht 10^{-16} relative Frequenzinstabilität
Ein Nd:YAG-Laser bei 946 nm wurde mithilfe einer selbstentwickelten digitalen PDH-Regelung inklusive Mischer und Phasenanpassung mit einer relativen Kurzzeitstabilität von $1{,}1 \cdot 10^{-16}$ in 1 s auf einen ULE-Resonator stabilisiert. Der Laser dient zur Spektroskopie der Multi-Ionen-ndiumuhr. In Kollaboration mit FB 4.3 wurde im Anschluss ein Transferlock auf einen kryogenen Silizium-Resonator realisiert, um eine Langzeitstabilität im 10^{-17}-Bereich zu erreichen.
(A. Didier, S. Ignatovich, E. Benkler und T.E. Mehlstäubler, alexandre.didier@ptb.de, tanja.mehlstaeubler@ptb.de)

Grundzustandskühlen eines hochgeladenen Ions
Eine wichtige Voraussetzung für Quantenlogikspektroskopie an hochgeladenen Ionen ist die Präparation der Ionen im quantenmechanischen Grundzustand der Bewegung. In einer Kollaboration mit dem MPIK in Heidelberg ist es am QUEST-Institut erstmalig gelungen, einen Kristall bestehend aus einem Beryllium-Ion und einem hochgeladenen Argon-Ion in zwei von sechs Bewegungsmoden in den Grundzustand zu kühlen. Dies ermöglicht die Suche nach dem magnetischen Dipolübergang bei 441 nm in Ar^{13+}.
(P. Micke, T. Leopold, S. King, P.O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@ptb.de)

Erster Einfang hochgeladener Ionen in einer kryogenen Paulfalle
Für die Präzisionsspektroskopie von hochgeladenen Ionen müssen diese aus der Produktionseinheit (Elektronenstrahlfalle) in eine kryogene Paulfalle überführt werden, wo sie sympathetisch von gefangenen Beryllium-Ionen gekühlt werden. In einer Kollaboration mit dem MPIK in Heidelberg ist es am QUEST-Institut gelungen, diesen wichtigen Schritt zu implementieren, der es erlaubt, in naher Zukunft die erreichbare relative Unsicherheit der Frequenzmessung optischer Übergänge in hochgeladenen Ionen um 10 Größenordnungen zu verringern. (P. Micke, T. Leopold, S. King, P.O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@ptb.de)

Meilenstein auf dem Weg zur transportablen Al^+-Quantenlogik-Uhr
Ein transportables Experiment für eine auf einem Al^+-Ion basierende Quantenlogik-Uhr wurde am QUEST-Institut der PTB aufgebaut und in Betrieb genommen. Grundzustandskühlen und Zustandskontrolle von gefangenen Ionen wurden demonstriert und der experimentelle Aufbau charakterisiert (veröffentlicht in arXiv:1901.02250). Die untersuchten systematischen Frequenzverschiebungen lassen eine Höhenauflösung im Bereich von wenigen cm für den zukünftigen Einsatz in der relativistischen Geodäsie erwarten.
(N. Spethmann, S. Hannig, Piet O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@ptb.de)

Uhrenlaser für eine transportable Al^+-Quantenlogik-Uhr in Betrieb genommen
Im Rahmen der Kooperation „Timing the future: micro-integrated lasers for next generation portable optical atomic clocks“ (SAW-2013-FBH-3) zwischen dem Ferdinand-Braun-Institut (Berlin) und dem QUEST-Institut der PTB wurde ein hybrider mikrointegrierter Laser erfolgreich in Betrieb genommen und getestet. Der Laser zeichnet sich durch sehr gute optische Eigenschaften bei gleichzeitig besonders kompakten Maßen und einen sehr robusten mechanischen Aufbau aus. Diese Eigenschaften ermöglichen den zukünftigen Einsatz als Uhrenlaser für die transportable Al^+-Quantenlogik-Uhr für die relativistische Geodäsie. (N. Spethmann, L. Pelzer, Piet O. Schmidt, QUEST, Piet.Schmidt@ptb.de)

Skalierbare Oberflächen-Ionenfallentechnologie fängt erstmals Ionen
Am QUEST-Institut wurden im Frühjahr 2018 erstmals $^9Be^+$-Ionen in einer mehrlagigen Oberflächen-Ionenfalle gefangen. Der Prozess zur Herstellung dieser Fallen wurde in den letzten Jahren an der PTB entwickelt und erlaubt es, elektrische Kontrollsignale in „vergrabenen“ Schichten der Struktur zu führen,

während die Ionen durch die Potentiale auf der obersten Schicht kontrolliert werden. Die Technologie wurde entwickelt für Quantensimulatoren und zukünftige Quantencomputer. (A. Bautista-Salvador, QUEST, amado.bautista@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Nutzung von DNA-Origami-Nanostrukturen als rückgeführte Längenmaßstäbe im Nanometerbereich
Nanostrukturen aus DNA-Material können mit hoher Reproduzierbarkeit mittels DNA-Origamitechnik hergestellt werden. Durch Anlagerung von einzelnen fluoreszierenden Molekülen an genau definierten Stellen lassen sich Längenmaßstäbe im Nanometerbereich realisieren. In einer Kooperation zwischen der PTB und der TU Braunschweig ist es nun gelungen, die Abstände zwischen den fluoreszierenden Molekülen rückgeführt zu messen. Damit kann die Leistungsfähigkeit moderner überauflösender optischer Mikroskope untersucht werden, welche z. B. die superauflösende Einzel-Molekül-Lokalisation nutzen. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Unterstützung der Nutzung von Galileo-Signalen
In der von Galileo-Satelliten gesendeten Navigationsnachricht ist eine Vorhersage der Differenzen zwischen Galileo-Zeit (GST) und GPS-Zeit (GPStime) (GST–GPStime, gen. GGTO) sowie zwischen GST und der Koordinierten Weltzeit UTC enthalten. Der Vergleich dieser Vorhersagen mit in der PTB mittels kalibrierter Empfänger erhaltenen Messwerten zeigt systematische Abweichungen von 2 ns bis 3 ns. Die Ursachen liegen in unterschiedlichen Methoden der Ermittlung der Signallaufzeiten in den Empfängern und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Rückführung eines disziplinierten Frequenznormals auf gesetzliche Einheiten
Im Rahmen von Akkreditierungen nach DIN EN ISO/IEC 17025 ist die Rückführung eines als Frequenznormal betriebenen disziplinierten Oszillators (DO) auf gesetzliche Einheiten wichtig. Als Referenzen können die Zeitsignale von GPS, Galileo oder des Langwellensenders DCF77 dienen. Die Anwendung der in diesem Zusammenhang relevanten Informationen aus dem PTB Time Service Bulletin wurde in [D. Piester, Technisches Messen **85**, 268 (2018)] detailliert beschrieben. Die größten für den Anwender in Kalibrierlaboren wichtigen auftretenden Unsicherheitsbeiträge stammen dabei typischerweise von der Instabilität der verwendeten Oszillatoren. (D. Piester, FB 4.4, dirk.piester@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Messplatz für gewichtete UV-Bestrahlungsstärke
An einem neu entwickelten Messplatz können bis zu fünf verschiedene UV-Strahler parallel betrieben werden, um die Empfindlichkeit von UV-Radiometern bezüglich gewichteter Bestrahlungsstärke zu ermitteln. Hierbei wird die spektrale Bestrahlungsstärke der einzelnen Strahler rechnerisch mit einer aktinischen Wirkungsfunktion gewichtet und das resultierende Integral mit der entsprechenden Anzeige der UV-Radiometer verglichen. (P. Sperfeld, FB 4.1, peter.sperfeld@ptb.de)

LED-Lichtstärkenormal für geplante Normlichtart entwickelt
Im Rahmen des EMPIR-Projekts PhotoLED und in Zusammenarbeit mit der Internationalen Beleuchtungskommission (TC 2-90) wurden LED-Referenzspektren untersucht und als Referenzlichtart für farbmetrische Untersuchungen in der CIE 015:2018 veröffentlicht. Ein Referenzspektrum wurde ausgewählt, um die dem Glühlampenlicht ähnliche Normlichtart A zu ergänzen (Alexander Kokka *et al* 2018 *Metrologia* **55** 526). Die PTB hat mehrere hochstabile Lichtstärkenormale entwickelt, die den geforderten Referenzspektren entsprechen. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

„Fisheye-Kameramethode“ in Ulbricht-Kugel integriert und validiert
Im Rahmen eines Gastwissenschaftleraufenthalts wurde eine Industriekamera mit 180°-Fisheye-Objektiv an der Ulbricht-Kugel der PTB installiert. Mittels an der PTB fortentwickelter Algorithmen wird aus den „Bildern“ der inneren Kugeloberfläche in Echtzeit der Lichtstärkeverteilungskörper der untersuchten Lampe bestimmt. Dieses schnelle und kostengünstige Verfahren konnte mithilfe des Robotergoniophotometers validiert werden und wird zur Reduzierung der Unsicherheit bei Messungen mit der Ulbricht-Kugel eingesetzt. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

Charakterisierung eines Asphärenmessgerätes mit rückgeführten Kalibrierflächen
Die für Rückführungszwecke bei Asphärenmessgeräten entwickelten Multiradienflächen wurden bezüglich der Sphärizität der Kugelsegmente mit einem Fizeau-Interferometer sequenziell gemessen. Diese Ergebnisse wurden zur Charakterisierung eines Tilted-Wave-Interferometers herangezogen. Die Übereinstimmung in den sphärischen Segmenten weist einen RMS-Fehler von weniger als 10 nm auf. (I. Fortmeier, FB 4.2, ines.fortmeier@ptb.de)

Entwicklung einer hochgenauen Referenzanlage zur Messung der Modulationstransferfunktion von Objektiven
In der PTB wird eine Referenzapparatur zur Messung der Modulationstransferfunktion (MTF) von Objektiven entwickelt, mit der eine Messunsicherheit von 0,01 ($k = 2$) angestrebt wird. Der Aufbau der Apparatur ist weit fortgeschritten, und erste Einflüsse der Komponenten auf die Messunsicherheit wurden untersucht. www.dgao-proceedings.de/download/119/119_p33.pdf (M. Schenker, FB 4.2, melissa.schenker@ptb.de)

Konzept zur interferometrischen Formmessung mit einer nachgeführten Mehrzeilenkamera
Mit einem neuartigen Konzept des zeilenbasierten Formmesssystems sollen asphärische Prüflinge mit Durchmessern bis zu 200 mm gemessen werden. Es wird hier das Konzept mit einer Mehrzeilenkamera und ein geeignetes Kalibrierobjekt zur Messung von Taumel- und Dezentrierungsfehlern vorgestellt. www.dgao-proceedings.de/download/119/119_p4.pdf (S. Laubach, FB 4.2, soeren.laubach@ptb.de)

Formmessung von Linsen mit der Multiple Aperture Shear Interferometry
Wir präsentieren eine neue Methode zur Messung der Linsenform, die wir als Multiple Aperture Shear Interferometry (MArS) bezeichnen und die als primäre Messgröße die spatiale Kohärenzfunktion des Lichts nutzt. MArS erlaubt die gleichzeitige Verwendung von mehreren unabhängigen Lichtquellen, um auch komplexe Formen zu erfassen. Erste Vergleichsmessungen mit der Wellenfrontmethode zeigen eine gute Übereinstimmung. www.dgao-proceedings.de/download/119/119_a12.pdf (G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

Hochgenaue und rückgeführte Charakterisierung von Wellenfrontsensoren
Im Rahmen eines Transfer-Projektes zwischen PTB und Optocraft GmbH wird eine rückführbare Kalibrierung von Wellenfrontsensoren (WS) entwickelt. Hierzu wurde ein Messplatz und ein Messprinzip zur Charakterisierung von Wellenfrontsensoren entwickelt. Es wurden Untersuchungen zur Wiederholbarkeit sowie zu den Auswirkungen bei Verwendung unterschiedlicher Lichtquellen durchgeführt. www.dgao-proceedings.de/download/119/119_p34.pdf (J. Bautsch, FB 4.2 johannes.bautsch@ptb.de)

Validierung der Farbtypeskala der ICUMSA auf neuem Messgerät
Um künftig die Kalibrierungen von Zuckerfarbtypen mit einem neuen Messverfahren durchführen zu können, wurde die Farbtypeskala der ICUMSA auf ein modernes Messgerät übertragen. Durch Bestimmung aller apparativen Einflüsse konnte die existierende Zuckerskala (Methode GS2-13 (2012)) beibehalten werden. Die Ergebnisse der PTB-Untersuchungen wurden durch den Projektpartner Nordzucker AG auf der ICUMSA-Tagung Ende August in Kapstadt vorgestellt. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

Rundvergleich zum winkelabhängigen Verhalten von Solarzellen
Der laser-basierte DSR-Messplatz der Arbeitsgruppe „Solarzellen“ hat an einem internationalen Rundvergleich zur Messung der Winkelabhängigkeit von Solarzellen teilgenommen. Die Kalibrierergebnisse der PTB waren für den gesamten Einfallswinkelbereich von 0° – 85° im Rahmen der angegebenen Messunsicherheit konsistent zum gewichteten Mittelwert der Gesamtgruppe ($E_N < 1$). Somit kann der laser-basierte DSR-Messplatz für die Kalibrierung der Winkelabhängigkeit von Solarzellen als validiert angesehen werden.
Riedel et al., „Interlaboratory comparison of methodologies for measuring the angle of incidence of solar cells”, Proceedings EUPVSEC 2018, Brüssel. (F.Riedel, FB 4.5)

Aufbau eines LED-basierten Solarmodulmessplatzes
Die neu gegründete Arbeitsgruppe 4.53 Solarmodule entwickelt einen neuartigen LED-basierten Messplatz, der es ermöglicht, Solarmodule nicht

nur höchstgenau, sondern auch für Fragestellungen aus dem Bereich des Energy-Rating unter nahezu beliebigen Lichtverhältnissen zu charakterisieren. Das Herzstück des Messplatzes bildet ein LED-basierter Sonnensimulator, der mit insgesamt 16 320 Hochleistungs-LEDs, verteilt auf 18 Farbkanäle, bestückt ist. (A. Schweitzer, FB 4.5, antje.schweitzer@ptb.de)

Multi-Ionen-Falle für Demonstrator einer kommerzialisierbaren Ionenuhr geht in die Prozessierung
Im OptiClock-Projekt wurde eine neue Chipfalle für den Multi-Ionen-Betrieb entwickelt für den Demonstrator einer ersten kommerzialisierbaren optischen Ionenuhr. Basierend auf einem früheren Design, welche eine Uhrenspektroskopie mit einer Genauigkeit von 10^{-19} ermöglicht, ist die neue Falle kompakter und wird in Kollaboration mit FB 5.5 einem vereinfachten Herstellungsprozess folgen. Eine erste Testversion wurde gefertigt. (A. Didier, M. Brinkmann, R. Meeß, D. Hagedorn und T.E. Mehlstäubler, alexandre.didier@ptb.de, tanja.mehlstaeubler@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Bestimmung von Größen- und Formparametern von Gold-Nanostäbchen mithilfe der Elektronenmikroskopie
Die physikalischen Eigenschaften stäbchenförmiger Goldpartikel mit Abmessungen im Nanometerbereich hängen stark von der Größe und Form der Goldpartikel ab. In einem internationalen Ringvergleich wurden elektronenmikroskopische Methoden zur Messung dieser Größen- und Formparameter entwickelt. Damit können jetzt z. B. etwaige Unterschiede zwischen verschiedenen Proben schnell und zuverlässig bestimmt werden. Das Verfahren wird derzeit in eine ISO-Norm überführt (ISO 21363). (E. Buhr, FB 4.2, egbert.buhr@ptb.de)

3. Topical Meeting Frontiers in Optical Metrology
Vom 8. bis 25. Oktober 2018 fand unter der Leitung des Bremer Instituts für angewandte Strahltechnik GmbH (Prof. Bergmann) und der PTB (Dr. Bodermann) in der TU Delft das 3. Topical Meeting *Frontiers in Optical Metrology* im Rahmen der biennalen Konferenz der European Optical Society EOSAM2018 statt. Mit rund 100 Teilnehmern und 56 wissenschaftlichen Beiträgen aus 19 Ländern war die Teilkonferenz sehr gut besucht. Schwerpunktthemen der *Frontiers in Optical Metrology* waren Nanometrologie, Oberflächenmetrologie für die Optikfertigung sowie optische Sensorik. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Abteilung 4 | Optik

Sekretariat
Ingrid Herrmann
Telefon: (0531) 592-4011
E-Mail: ingrid.herrmann@ptb.de

https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt4.html

Stand: 12/2018

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.